

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Facultad de Ingeniería

Postgrado de Ingeniería Vial



**VULNERABILIDAD GEOTÉCNICA DEL BORDE DE LA TERRAZA DE
MÉRIDA**

Autor: Francisco Javier Herrera Rodriguez

Tutor: PhD. Norly Belandria.

Mérida, Enero de 2018.

C.C.Reconocimiento

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Facultad de Ingeniería

Postgrado de Ingeniería Vial



**VULNERABILIDAD GEOTÉCNICA DEL BORDE DE LA TERRAZA DE
MÉRIDA**

**Tesis presentada como requisito parcial para optar al Grado de
Magister en Ingeniería Vial**

Autor: Francisco Javier Herrera Rodriguez

Tutor: PhD. Norly Belandria.

Mérida, Enero de 2018.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
POSTGRADO DE INGENIERÍA VIAL

VULNERABILIDAD GEOTÉCNICA DEL BORDE DE LA TERRAZA DE MÉRIDA

Autor: Ing. Francisco J. Herrera R.

Tutor: PhD. Norly Belandria

Fecha: Enero 2018

RESUMEN

La ciudad de Mérida se asienta sobre una meseta alargada que cubre más de 50 kilómetros cuadrados de área. Justo a lo largo del borde de la meseta, que tiene una altura media aproximada de 100 metros con respecto a la cota del Río Chama, en sus 18 kilómetros de extensión existe grado de vulnerabilidad geotécnica debido a un posible colapso o derrumbe del talud. A partir de datos sísmicos provenientes de FUNVISIS se buscan de manera indirecta parámetros del suelo indispensables para el posterior estudio de la estabilidad en diferentes cortes en el talud en cuestión, por diferentes métodos de equilibrio límite, obteniéndose el factor de seguridad, así mismo se calcula a través de la teoría del colapso el coeficiente sísmico horizontal, y como resultado final distancias horizontales de retiro con respecto al borde de la terraza, considerando métodos y parámetros detonantes como condición de suelo saturado, o el ya mencionado sismo. Con el fin de adecuar un ordenamiento territorial que garantice la seguridad a los habitantes de la zona, se realiza un mapa de vulnerabilidad geotécnica y retiro, donde se obtienen resultados que indican que la zona centro-norte del borde de la terraza es el área con mayor vulnerabilidad geotécnica, y la zona sur con menor grado, concluyendo así que existe un alto riesgo en el borde de la terraza, de vidas humanas e infraestructura, por lo tanto se recomienda que el ordenamiento territorial sea evaluado por los entes estatales competentes, y aplicar soluciones que mitiguen la vulnerabilidad geotécnica en el área en estudio.

Palabras clave: Vulnerabilidad, Colapso, Talud, Retiro, Sismo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso, que me brinda lo más importante en la vida y el impulso de lograr mis metas por medio del esfuerzo y la perseverancia.

A mis Padres, porque son ellos mis guías, y también son el motivo y la razón de crecer profesionalmente.

A mi tutora, la Doctora Norly Belandria, profesora de la escuela de geológica, por toda su valiosa ayuda científica y profesional, fue para mí un privilegio contar con usted y recibir su tutoría en este trabajo de investigación, infinitas gracias.

Al Profesor Roberto Úcar, experto en el área de geotecnia, por su enorme orientación en cuanto a la metodología aplicada en esta investigación y por sus valiosos aportes.

Al Ingeniero Geólogo Daniel Rivas, por su disponibilidad y ayuda en cuanto a la ejecución de programas útiles para la construcción de mapas.

A la ilustre Universidad de Los Andes, por formarme y capacitarme. Siempre serás mi alma máter.

Al Ingeniero Civil Engelber Sánchez, por toda su incondicional amistad y compañerismo en todo el trayecto de esta Maestría.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	4
1.1 Planteamiento del Problema.....	4
1.2 Formulación del Problema	5
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Justificación de la Investigación	5
1.5 Limitaciones.....	6
1.6 Ubicación del área en estudio	6
CAPÍTULO 2	10
Marco Teórico.....	10
2.1 Antecedentes de la Investigación	10
2.2 Bases Teóricas.....	15
2.2.1 Líneas ReMi	15
2.2.2 Onda Sísmica: Onda P y S	15

2.2.3	Parámetros resistentes	15
2.2.4	Módulo o coeficiente de balasto (K)	16
2.2.5	Factor de Seguridad.....	16
2.2.6	Estabilidad de taludes	17
2.2.7	Métodos de análisis de estabilidad.....	18
2.2.8	Taludes en suelos	18
2.2.9	Métodos de rebanadas.....	19
2.2.10	Teoría del colapso.....	24
2.2.11	Cálculo Variacional.....	30
2.2.12	Retiro.....	35
2.2.13	Vulnerabilidad	36
2.2.14	Amenaza	38
2.2.15	Riesgo	39
2.2.16	Spline	39
CAPÍTULO 3	41
3.1.	Tipo de Investigación.....	41
3.2.	Nivel y diseño de investigación:.....	42
3.3.	Población y muestra:	45
3.3.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos:.....	47
3.4	Datos proporcionados por FUNVISIS y estimación de parámetros resistentes.	49
3.4.1	Espesores de las capas, en todas las líneas ReMi en estudio.....	49
3.4.2	Velocidades de compresión y de corte proporcionadas por FUNVISIS.....	53

3.4.3	Peso Unitario.....	54
3.4.4	Coeficiente de Balasto	55
3.4.5	Ángulo de fricción estimado	57
3.4.6	Cohesión Calculada.	61
3.5	Estudio de estabilidad del talud del borde de la terraza de Mérida	62
3.5.1	Determinación del factor de seguridad y retiro a través del método de equilibrio límite, estado seco	63
3.5.2	Determinación del Factor de Seguridad y retiro a través del método de equilibrio límite, Saturado.....	74
3.5.3	Determinación del factor de seguridad a través del método de equilibrio límite, con carga sísmica	76
3.5.4	Retiro según profundidad por método de equilibrio límite:	78
3.6	Aplicación de la Teoría de Colapso en la estabilidad de taludes.....	82
3.6.1	Aplicación de la Teoría de Colapso utilizada en rotura espiral logarítmica.....	84
3.6.2	Aplicación de la Teoría de Colapso utilizada en rotura plana.....	87
3.6.3	Aplicación de la Teoría de Colapso utilizada en rotura circular	90
3.7	Cálculo variacional aplicado a la estabilidad de taludes	92
3.7.1	Cálculo variacional utilizada en rotura circular	93
3.7.2	Cálculo variacional utilizada en rotura plana	95
3.8	Retiro en el borde de la terraza de Mérida.	97
3.9	Estudio de vulnerabilidad geotécnica en el borde de la terraza de Mérida.....	101
3.10	Estudio de Amenaza en el borde de la terraza de Mérida	106

3.11 Estudio de Riesgo en el borde de la terraza de Mérida	110
CAPÍTULO 4.....	114
4.1 Análisis de Resultados.....	114
Conclusiones	120
Recomendaciones	123
Referencias Bibliográficas	125
ANEXOS.....	129
ANEXOS 1:.....	130
DATOS PROPORCIONADOS POR FUNVISIS	130
ANEXOS 2:.....	143
MODELOS DEL TALUD EN SOFTWARE SLIDE	143
ANEXOS 3:.....	152
ANÁLISIS DEL TALUD EN PROGRAMA MAPLE	152

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del área en estudio.....	7
Figura 2. Distribución de las 9 líneas ReMi en estudio en la terraza de la ciudad de Mérida	8
Figura 3. Esquema de fuerzas actuantes en un talud.....	17
Figura 4. Estado de fuerzas actuantes sobre una superficie de terreno por método de Fellenius.....	21
Figura 5. Diagrama para determinar el factor f_0 para el método de Janbú....	22
Figura 6. Parámetros necesarios en un talud para aplicar la teoría del colapso para la rotura espiral logarítmica	24
Figura 7. Parámetros necesarios en un talud para aplicar la teoría del colapso para la rotura plana.....	30
Figura 8. Parámetros, involucrados en el talud aplicando cálculo variacional	31
Figura 9. Ilustración de concepto de distancia de retiro en el borde de la terraza.....	35
Figura 10. Espesor de los estratos según su ubicación (capa 1).....	49
Figura 11. Espesor de los estratos según su ubicación (capa 2).....	50
Figura 12. Espesor de los estratos según su ubicación (capa 3).....	51
Figura 13. Valores del coeficiente de reacción o balasto en función de los parámetros de corte.....	60
Figura 14. Ubicación de perfiles de taludes en estudio.....	62
Figura 15. Modelo del talud LR5A (Facultad de Forestal) a través del método de equilibrio límite	64
Figura 16. Modelo del talud LR6A (Avenida universidad) a través del método de equilibrio límite	65
Figura 17. Modelo del talud LR7A (Vuelta de lola) a través del método de equilibrio límite	66
Figura 18. Modelo del talud LR8A (Campo de oro) a través del método de equilibrio límite	67

Figura 19. Modelo del talud LR9A (Facultad de Medicina) a través del método de equilibrio límite	68
Figura 20. Modelo del talud LR10A (Estadio Lourdes) a través del método de equilibrio límite	69
Figura 21. Modelo del talud LR18 (Aeropuerto Alberto Carnevalli) a través del método de equilibrio límite	70
Figura 22. Modelo del talud LR28. (Zumba) a través del método de equilibrio límite	71
Figura 23. Modelo del talud LR30 (Avenida Andrés Bello) a través del método de equilibrio límite	72
Figura 24. Modelo LR10A (estadio Lourdes) por método de equilibrio límite en estado saturado, análisis a todo el talud	74
Figura 25. Modelo LR10A (estadio Lourdes) con carga sísmica, $K_h=0,3$, análisis a todo el talud	77
Figura 26. Modelo LR10A (estadio Lourdes) estado de saturación, análisis en las primeras 2 capas	79
Figura 27. Modelo LR10A (estadio Lourdes) con carga sísmica, $K_h=0,3$, análisis en las primeras 2 capas	80
Figura 28. Cálculo de los parámetros resistentes de un talud para usar programa Maple en teoría de colapso.	83
Figura 29. Parámetros para usar teoría de colapso, rotura plana.	88
Figura 30. Variables principales para aplicar el método de cálculo variacional	93
Figura 31. Mapa de Retiro del borde de la terraza de Mérida, método de equilibrio límite, estado saturado 100 %	98
Figura 32. Mapa de Retiro del borde de la terraza de Mérida, método de equilibrio límite, con carga sísmica, $K_h=0,3$	99
Figura 33. Mapa de Retiro del borde de la terraza de Mérida, por teoría del colapso, rotura espiral	100
Figura 34. Mapa de Vulnerabilidad del borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, estado saturado 100%	102
Figura 35. Mapa de Vulnerabilidad del borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, con carga sísmica $K_h=0,3$	103
Figura 36. Mapa de Vulnerabilidad del borde de la terraza de Mérida, por teoría del colapso, rotura espiral	104
Figura 37. Mapa de amenaza en el borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, estado saturado 100%	108

Figura 38. Mapa de amenaza en el borde de la terraza de Mérida, por teoría de colapso, rotura espiral.....	109
Figura 39. Mapa de riesgo en el borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, estado saturado 100%	111
Figura 40. Mapa de riesgo en el borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, con carga sísmica $K_h=0,3$	112

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas UTM de las líneas ReMi en estudio y lugar de referencia en la ciudad de Mérida.....	9
Tabla 2. Valores de vulnerabilidad social o humana (Imiriland, 2007)	37
Tabla 3. Valores de vulnerabilidad física al impacto de deslizamientos de tierra (Imiriland, 2007).....	37
Tabla 4. Valores de vulnerabilidad económica debida a la interrupción de una carretera por deslizamientos de tierra. (Imiriland, 2007)	38
Tabla 5. Escalas recomendadas para la zonificación de amenaza por deslizamientos (Suarez, 2009).....	39
Tabla 6. Velocidades de onda, V_p y V_s	53
Tabla 7. Peso unitario de las capas	55
Tabla 8. Coeficiente de Balasto (K)	56
Tabla 9. Relación entre ángulo de fricción y Velocidad de compresión	57
Tabla 10. Valores de Ángulo de fricción interna (ϕ)	58
Tabla 11. Valores de cohesión (C).....	61
Tabla 12. Factores de seguridad, estado seco	73
Tabla 13. Factor de seguridad y Retiros, estado saturación 100%.....	75
Tabla 14. Factor de seguridad, con carga sísmica ($K_h=0,3$).....	78
Tabla 15. Retiros según profundidad por método de equilibrio límite, estado de saturación y con carga sísmica.....	81
Tabla 16. Valores promedios de parámetros de resistentes para los diferentes modelos.....	83
Tabla 17. Valores de parámetros y resultados en Teoría de Colapso utilizada en rotura espiral logarítmica.....	86
Tabla 18. Valores de parámetros y resultados en Teoría de Colapso utilizada en rotura plana.....	89
Tabla 19. Valores de parámetros y resultados por Teoría de Colapso utilizada en rotura circular	91

Tabla 20. Factor de seguridad y retiro obtenido por cálculo variacional, rotura circular.	94
Tabla 21. Factor de seguridad y retiro obtenido por cálculo variacional, rotura plana	96

www.bdigital.ula.ve

INTRODUCCIÓN

La corteza terrestre está formada por un material biológicamente activo, el suelo, que funciona como parte del sistema de fundación de cualquier obra civil, por lo tanto tiene un grado de importancia determinante al momento del diseño y construcción de alguna obra de infraestructura. Es vital determinar su comportamiento, competencia, capacidades y para esto se debe conocer su origen y características actuales, a través de propiedades fundamentales como coeficiente de fricción, cohesión, peso unitario, compresibilidad, capacidad portante y resistencias a la gradación.

En este mismo sentido, en la superficie terrestre existen diferentes tipos de topografía que exigen un trato diferente en el estudio del suelo, ya que no es lo mismo estudiar un suelo en zona montañosa, que uno en zona llana, o por citar otro ejemplo, en el área interior de una terraza, que en la cresta de un talud, ya que geotécnicamente hablando, este último caso mencionado posee características particulares como: poco o nulo grado de confinamiento a lo largo de la cara del talud, que trae como consecuencia la amplificación de ondas sísmicas, además, generalmente tiene una susceptibilidad importante que varía según la pendiente del talud en estudio.

Por otro lado, se conoce el caso de alta densidad de población en la ciudad de Mérida, estado Mérida, específicamente, a lo largo del borde de la terraza que sirve de fundación para dicha ciudad. Esta terraza forma un talud con respecto al Río Chama de 100 metros de altura en promedio, y sabiendo que existe un historial importante de eventos sísmicos, debido a las diferentes fallas geológicas que están cercanas a la ciudad, como la falla de Boconó, esto causa problemas de diferente índole, y entre los más importantes se tienen: vulnerabilidad de vidas humanas, de elementos físicos, ambientales, entre otros.

Dadas las condiciones que anteceden, la presente investigación plantea estudiar la vulnerabilidad geotécnica a lo largo del borde de la terraza de Mérida, analizando nueve líneas ReMi, que representan nueve modelos del talud mencionado, y así obtener valores que indiquen el grado de vulnerabilidad, amenaza y riesgo, dando a conocer mapas que expresen dichos resultados.

El capítulo I contiene el planteamiento y formulación del problema, el cual expresa el desconocimiento sobre la vulnerabilidad en el borde de la terraza de Mérida, y como consecuencia el grave problema de riesgo en elementos físicos, y sobre todo vidas humanas en la zona, por lo que el objetivo de la investigación, es determinar el grado de vulnerabilidad, y construir un mapa de retiro para el uso humano del área en la terraza más cercana al borde. Además, este capítulo contiene la justificación del problema, que se basa en la alta demografía existente en la zona en estudio, que está en riesgo con un grado desconocido. Tiene como limitante el tamaño de la muestra, de 9 modelos del talud, a lo largo de aproximadamente 18 kilómetros de borde de la terraza. El capítulo II indica antecedentes, como son las diferentes investigaciones realizadas sobre temas relacionados con la estabilidad del talud de la terraza de Mérida, trabajos de susceptibilidad del talud en cuestión, proyecto de estabilización de un área del talud para la obra metro-cable que comunica el centro de la ciudad con el sector San Jacinto, además de artículos que expresan métodos de estabilidad de talud útiles para la presente investigación. Este capítulo contiene conceptos y teorías necesarias para el desarrollo del presente trabajo, vulnerabilidad, amenaza, riesgo, estabilidad en taludes, parámetros resistentes, factor de seguridad, módulo de balasto, teoría de colapso, método de cálculo variacional, todos temas esenciales para la ejecución y comprensión de la investigación. El capítulo III contiene el desarrollo del trabajo comenzando con el cálculo de los parámetros resistentes a partir de datos proporcionados por FUNVISIS, para luego aplicar los métodos de equilibrio límite, teoría de colapso y método de

cálculo variacional y conseguir factor de seguridad, distancia de retiro, y coeficiente sísmico para los 9 modelos del talud en estudio. El capítulo IV explica los resultados obtenidos, basándose en la vulnerabilidad encontrada en los 9 modelos del talud, así como las distancias de retiro en cada uno de ellos en función de la amenaza sísmica y de estado de saturación. Posteriormente, se exponen las conclusiones obtenidas al culminar la investigación, expresando de forma concreta el producto de análisis de resultados y culminación del trabajo. Finalmente, se encuentra una serie de recomendaciones que deben ser tomadas en cuenta por los entes estadales que tengan competencia en los ámbitos de planeamiento urbano, gestión de riesgo, e ingeniería civil, específicamente aplicada en el área de geotecnia.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 1

El primer capítulo de la investigación explica el problema, sus características, causas, factores de influencia, y consecuencias para el cual se desarrolla un estudio con un objetivo general y objetivos específicos, además expresando las limitaciones y ubicación del área en estudio.

1.1 Planteamiento del Problema

La ciudad de Mérida, específicamente en toda la longitud del borde de la terraza donde se asienta, está descontrolada y peligrosamente poblada por habitantes que desconocen la vulnerabilidad en que se ubican sus viviendas y estructuras con diferentes funcionalidades, como, institutos médicos, educativos, edificaciones de oficinas, de entretenimiento, entre otros.

El desconocimiento de la vulnerabilidad y por lo tanto el riesgo no solo pasa por los habitantes, también pasa por las instituciones del estado que les corresponde el manejo de dicha información, para alertar y hacer cumplir una óptima y segura distribución urbana. Sabiendo que el suelo de la meseta que funda la ciudad es de origen aluvial y que forma un talud que en su longitud varía entre 100 y 150 metros de altura, existe la interrogante de cuan vulnerable está dicha área, teniendo en cuenta su alta densidad poblacional junto a la alta eventualidad sísmica que se experimenta en la meseta.

Al desconocerse las condiciones geotécnicas, la vulnerabilidad del talud y por lo tanto el riesgo de las estructuras en esta zona específica, surgen para el investigador las siguientes interrogantes: ¿cómo se puede llevar a cabo un ordenamiento territorial acorde a la realidad actual?, ¿qué información del suelo se requiere obtener para determinar los tipos de curvas que permitan emular y predecir en diferentes cortes del borde de la terraza su comportamiento y estabilidad?, para obtener distancias de retiro con

respecto al borde y garantizar la seguridad de cualquier estructura a construirse en dicha área.

1.2 Formulación del Problema

Existe un desconocimiento por parte de las instituciones del estado y por lo tanto de la población que habita la ciudad de Mérida, del grado de vulnerabilidad geotécnica del borde de la terraza de Mérida, que funciona como fundación de todas las estructuras que actualmente existen y continúan construyéndose en la mencionada zona, la cual está densamente poblada, por viviendas unifamiliares, instituciones públicas, privadas, y vialidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar la vulnerabilidad geotécnica en el borde de la meseta de la ciudad de Mérida.

1.3.2 Objetivos específicos

Obtener propiedades del suelo a través de datos sísmicos.

Determinar diferentes curvas de rotura del talud utilizando diferentes métodos.

Establecer distancia superficial de retiro del límite de la terraza para la construcción y habitabilidad.

Construir mapas de retiro, vulnerabilidad, amenaza y riesgo geotécnico del borde de la terraza de la ciudad de Mérida.

1.4 Justificación de la Investigación

Analizando la situación de la ciudad de Mérida, que cada vez se hace más atractiva para los habitantes del estado, por lo que su demografía ha ido aumentando como los pronósticos lo han anunciado las últimas décadas,

poblando así todas las áreas del casco central incluyendo el borde de la meseta donde se asienta la ciudad, causando así un riesgo de colapso o derrumbe de estructuras de magnitud desconocida en dicha zona. Se realiza el estudio geotécnico de esta área, que permite conocer el riesgo mencionado, determinando la vulnerabilidad, para lograr ilustrar claramente mediante mapas geotécnicos, cuáles son las zonas donde no se debe construir, cuál es la superficie que debe ser evaluada para la construcción de obras de estabilización de talud y así atenuar la vulnerabilidad, además si es necesario cuales áreas deben ser evacuadas, pensando en las pérdidas económicas, infraestructura, vialidad y sobre todo siempre en la vida humana como prioridad en el desarrollo urbano.

1.5 Limitaciones

No se cuenta con perforaciones geotécnicas que muestren información de todo el modelo del talud.

La muestra es muy limitada ya que son 9 líneas ReMi en estudio a lo largo de casi 18 kilómetros.

1.6 Ubicación del área en estudio

El área en estudio, se ubica a lo largo de todo el borde de la terraza de la ciudad de Mérida, Estado Mérida, Venezuela, analizando 9 modelos del talud, distribuidos en la meseta de Mérida (ver Figura 1 y 2).



(a) Mapa de Venezuela



(b) Estado Mérida



(c) Ciudad de Mérida

Figura 1. Localización del área en estudio. (a) y (b) tomada de <https://www.google.co.ve/search?rlz>, (c) tomada de <https://www.google.co.ve/maps/>

La Figura 2 muestra la distribución de 26 líneas ReMi ejecutadas por FUNVISIS señaladas con un punto verde y distribuidas en toda la terraza de la ciudad de Mérida, que para la presente investigación solo se tienen en cuenta las encontradas en el Río Mucujún y Río Chama. (Señaladas en color amarillo)

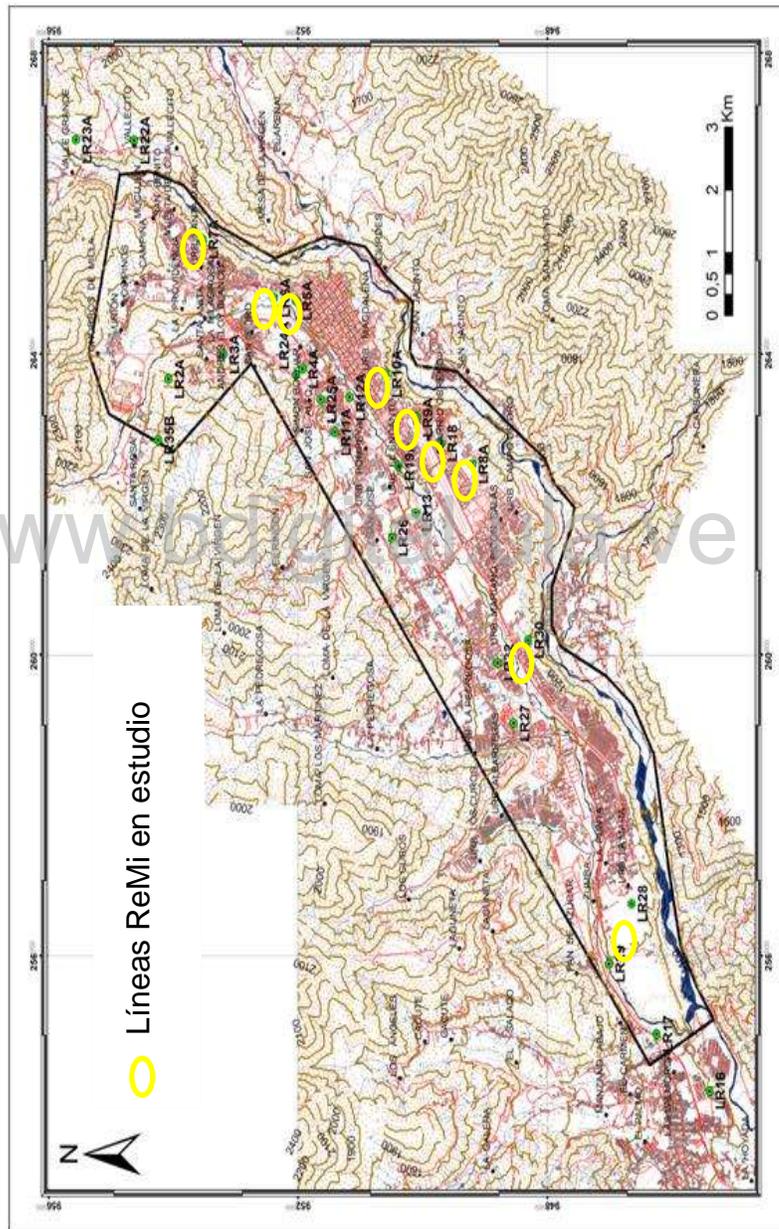


Figura 2. Distribución de las 9 líneas ReMi en estudio en la terraza de la ciudad de Mérida

La Tabla 1 expresa la ubicación de las 9 líneas ReMi en estudio con sus respectivas coordenadas y lugar de referencia en la ciudad de Mérida.

Tabla 1. Coordenadas UTM de las líneas ReMi en estudio y lugar de referencia en la ciudad de Mérida.

Línea ReMi utilizada en este estudio	ESTE	NORTE	Lugar de referencia
LR5A	264709	952032	Faculta de Forestal
LR6A	264748	952385	Avenida Universidad
LR7A	265526	953536	Vuelta de Lola
LR8A	262536	949205	Campo de Oro
LR9A	263157	950097	Facultad de Medicina
LR10A	263737	950593	Estadio Lourdes
LR18	262814	949703	Aeropuerto Alberto Carnevalli
LR28	256694	946650	Zumba
LR30	260195	948308	Avenida Andrés Bello

CAPÍTULO 2

En este capítulo se expresa todo lo concerniente al material ya existente relacionado con la presente investigación, además que forme parte del aporte teórico al estudio, como lo son, los antecedentes de la investigación y las bases teóricas.

Marco Teórico

2.1 Antecedentes de la Investigación

Existen trabajos de investigación que tienen como objetivo ofrecer información técnica sobre la estabilidad de los taludes en el borde de la ciudad de Mérida, y así sugerir a las entidades del estado pertinentes con el tema, cuáles son las áreas de la terraza que sirve como fundación a la ciudad donde no se debe habitar o existe un grado de vulnerabilidad, que posiblemente lleve a un riesgo de vidas humanas, elementos físicos, vialidad, y el ambiente.

En este sentido, Peña, Toro, y Ramírez (2016), en su trabajo de investigación, “Zonificación de áreas susceptibles a ser afectadas por movimientos de masa en el talud de la terraza de Mérida, entre los sectores Belén y Santa Elena, municipio Libertador del estado Mérida”, dicho estudio toma en cuenta rangos de pendientes, unidades hidrogeomorfológicas, geología, cobertura vegetal y uso del suelo. Este trabajo da como resultado una alta susceptibilidad en toda el área correspondiente a la cara del talud, disminuyendo notablemente este índice al llegar a cota de la ciudad. Esta investigación es ejemplo de los distintos tipos de metodologías que se pueden usar para el estudio de estabilidad de taludes al realizar este con el método de superposición de mapas.

Abarcando el mismo tema de susceptibilidad en la misma área de interés para la presente investigación se hace presente Fermín y Ramírez (2016), con el trabajo “Zonificación de susceptibilidad ante procesos

hidrogeomorfológicas en la zona comprendida desde el sector Santa Juana hasta el sector la Punta, en el municipio Libertador del estado Mérida”. Haciendo uso de la misma metodología de la investigación mencionada anteriormente, se obtiene los mismos resultados al tener alta y muy alta susceptibilidad solo en la cara del talud en toda la longitud del borde de la terraza que alcanza la investigación. Esto se debe posiblemente a que la metodología de estudio de susceptibilidad es muy sensible y tiene como factor determinante las pendientes, que en el caso del borde de la terraza cambia drásticamente, de la cara del talud con pendientes mayores a 45%, a la cresta y área de la ciudad que tiene pendientes de entre 0 y 10%, sin pasar por un área de transición entre estos dos rangos de pendientes.

Otro caso con el mismo estudio del talud de la terraza de Mérida es el realizado por Maldonado, Alvarado, y Ramírez (2016) titulado “Zonificación de las áreas susceptibles por los movimientos de masa en el talud comprendido entre los Ríos Chama y Mucujún entre los sectores de Vuelta de Lola –Santa Juana, del municipio Libertador, estado Mérida” en el cual se obtiene prácticamente los mismos resultados que las 2 investigaciones anteriores, concluyendo que existe un gran área de alta susceptibilidad en la cara del talud.

Estas últimas tres investigaciones hacen un importante aporte sobre la susceptibilidad a lo largo del talud de la terraza de Mérida, y pone en evidencia que las altas pendientes existentes en el talud en cuestión, es el principal parámetro que determina el alto grado de susceptibilidad en el área.

Un importante y destacado proyecto sobre el talud de la terraza de Mérida fue el realizado por Úcar (2010), “Análisis de la estabilidad de taludes y diseño del soporte en la cuenca del Chama” para el “Sistema de transporte masivo para área metropolitana de Mérida-Línea 3, trolcable en la ciudad de Mérida”, el cual es de gran utilidad para la obtención de parámetros resistentes, teniendo como datos velocidades de compresión y de corte, y así

iniciar el proceso de análisis de estabilidad de talud por los distintos métodos de la presente investigación. Además, este trabajo, permite comparar valores y parámetros que guían a un adecuado desenlace de análisis de resultados. También proporciona valores útiles como el coeficiente sísmico horizontal, más probable en la ciudad de Mérida.

Fue presentado por Bongiorno, Belandria, Castillo y Molina (2015), un estudio de estabilidad de taludes, que mediante inspecciones visuales, lograron clasificar los taludes en estudio con una vulnerabilidad importante, que ameritaba un estudio más profundo. Pasando por revisión bibliográfica, toma de datos en campo, ensayos de laboratorio, para finalizar con análisis y resultados. Se realizó la clasificación de los suelos y macizo rocosos presentes, para luego obtener los tipos de rotura posibles en dichos taludes y obtener el factor de seguridad que permita analizar qué tan estables o inestables están dichos taludes. Los resultados obtenidos fueron que los macizos rocosos tienen una estabilidad que va de grados medianamente estables a poco estables y los suelos en general son estables, pero al tener presencia de saturación de agua se comportan inestables. Se recomendó en las áreas de suelos canalizar quebradas y siembra de vetiver para mejorar su estabilidad y en el caso de macizos la creación de sistema de drenaje.

Bongiorno, Belandria, Castillo y Molina (2015) se enfocan en el estudio de los dos tipos de talud que existen, de macizo rocoso o de suelos, y es del interés para la presente investigación especialmente el talud de suelos, ya que la meseta de Mérida es suelo de origen aluvial. Se logrará aprovechar la forma de recolección de datos para la clasificación y análisis de suelos, algunos obtenidos mediante estudios de laboratorio y otro por observación en campo, así como a su vez el programa usado para el factor de seguridad de la estabilidad de talud "Slide". Además de tener en cuenta las recomendaciones hechas en el estudio y lograr profundizarlas o anexarlas en un posible caso en la investigación presente.

El trabajo presentado por Belandria y Úcar (2015), expresa la comparación de la rotura parabólica con dos métodos aplicando las condiciones de equilibrio y la rotación de ejes, para determinar el nuevo tensor de esfuerzos, los cuales tiene como función analizar la inestabilidad de taludes en obras civiles o minería generada por cargas externas que influyen en los movimientos en masa produciendo deslizamientos que terminan poniendo en riesgo toda el área en cuestión. La comparación se llevó a cabo en un corte vertical de 6 metros de altura, en el estudio se determina la tensión normal y el factor de seguridad. Se obtuvieron resultados con diferencias insignificantes, por lo que se logró validar el método numérico propuesto al aplicar el cálculo de variaciones.

Los autores proporcionan un nuevo método para calcular el factor de seguridad para la estabilidad de un talud, como es, el método numérico, al aplicar la técnica de rotación de ejes. Sin embargo, gracias a este estudio se puede observar y estudiar dos métodos de gran utilidad, el propuesto ya mencionado (técnica de rotación de ejes) y la técnica del cálculo variacional el cual tiene en cuenta dos factores que para la presente investigación son determinantes, los cuales son el factor sismo y que existan diferentes estratos que generan un sistema de ecuaciones no lineales.

Belandria, Bongiorno, Rivas , y Moreno (2015) en este estudio se genera un mapa de riesgo geotécnico, a partir de características geomecánicas de los macizos rocosos y suelos, que se encuentran en la vía Mérida-Jají del municipio Campo Elías del estado Mérida, teniendo como elementos principales para la obtención de dicho mapa, la zonificación de susceptibilidad, vulnerabilidad, amenaza, para el resultado final de riesgo geotécnico. Es en el estudio de vulnerabilidad de este artículo que radica la utilidad para la presente investigación, ya que se usa la misma metodología (Suarez, 2009) que toma en cuenta las áreas pobladas, obras civiles y

vulnerabilidad socioeconómico para conseguir el objetivo de determinar el grado de vulnerabilidad del borde de la terraza de la ciudad de Mérida.

Rivas, Meza, Belandria, y Bongiorno (2016) presentan un artículo que evalúa el riesgo geotécnico con un abordaje con modelos cuantitativos computacionales con evaluaciones multivariantes. Inicia realizando una compilación de información geológica y caracterizando las secciones aflorantes de suelos residuales, y tras asumir un análisis de equilibrio límite con mecanismo de rotura circular, para el modelo de estabilidad utilizando el criterio de Mohr-Coulomb para el comportamiento del suelo, se realizan los modelos de taludes en el software Slide, para culminar con la zonificación de susceptibilidad, vulnerabilidad, amenaza, para el resultado final de riesgo geotécnico. Al igual que el artículo anterior este influye en la presente investigación, al realizar el estudio de vulnerabilidad con la misma metodología de Suarez (2009), y además calculando el factor de seguridad con la misma metodología de análisis de equilibrio límite y asumiendo mecanismo de rotura circular.

López, Mejía y Vega (2008) presentan un trabajo de investigación titulado “Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P”, el cual estudia el método de refracción sísmica para determinar velocidades de onda de compresión, posteriormente, relacionar dichas velocidades de onda con parámetros resistentes, como el ángulo de fricción, cohesión, y con propiedades como la densificación, ripabilidad, y rigidez del suelo. Por lo antes mencionado, es de gran utilidad para la presente investigación, y así basarse en las estimaciones de valores de ángulo de fricción.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Líneas ReMi

Son líneas de refracción sísmica que permiten medir el tiempo de recorrido de ondas en el subsuelo, usando un tendido de sensores llamados geófonos en la superficie, en línea recta a distancias conocidas y llevando a cabo un impacto de energía (con un martillo o detonación de explosivos) en uno de los extremos del tendido, induciendo vibraciones en el terreno que se propagan por el subsuelo y que son detectadas por cada uno de los sensores en la superficie. El análisis de las mediciones de estas vibraciones, permiten la obtención de velocidades de onda primaria P y secundarias S, o también llamadas velocidades de compresión y de corte respectivamente.

2.2.2 Onda Sísmica: Onda P y S

Las ondas P (primarias) son ondas longitudinales o de compresión, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces más que la de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material.

Las ondas S (secundarias) son ondas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación. Su velocidad es menor que la de las ondas primarias. Es por esto, que aparecen en el terreno un tiempo después que las primeras. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños.

2.2.3 Parámetros resistentes

Los principales parámetros resistentes son: la cohesión y ángulo de fricción interna.

Úcar (2010) define estos dos parámetros así:

“La cohesión (C) es la propiedad básica de un suelo fino de ofrecer resistencia a los cambios de forma o distorsión, debido a la ligazón entre sus partículas, que son tan pequeñas como para estar sujetas a fuerzas de tipo eléctrico y molecular. En términos de la ecuación de Mohr-Coulomb es la resistencia al corte a cero esfuerzo normal.

El ángulo de fricción interna (ϕ) permite determinar la resistencia al desplazamiento producida por la interferencia de las partículas en el plano de falla, siendo la resistencia al corte directamente proporcional a la presión normal”

2.2.4 Módulo o coeficiente de balasto (K)

El coeficiente de reacción del suelo o módulo de fundación o balasto tiene una relación directa con la velocidad de corte V_s del suelo.

El coeficiente de reacción o de balasto se determina a través de la ecuación 1 desarrollada por Tezcan (2007), dicho valor es necesario para determinar las propiedades mecánicas de cada una de las capas. Se obtiene en función del peso unitario y la velocidad de onda S.

$$K = 4 \cdot \gamma \cdot V_s \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

2.2.5 Factor de Seguridad

La relación entre las fuerzas estabilizadoras o resistentes y las fuerzas motoras o las que desestabilizan el talud (ver ecuación 2), dan como resultado el factor de seguridad de un determinado talud, para determinadas condiciones.

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{Fuerzas resistentes}}{\text{Fuerzas motoras}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

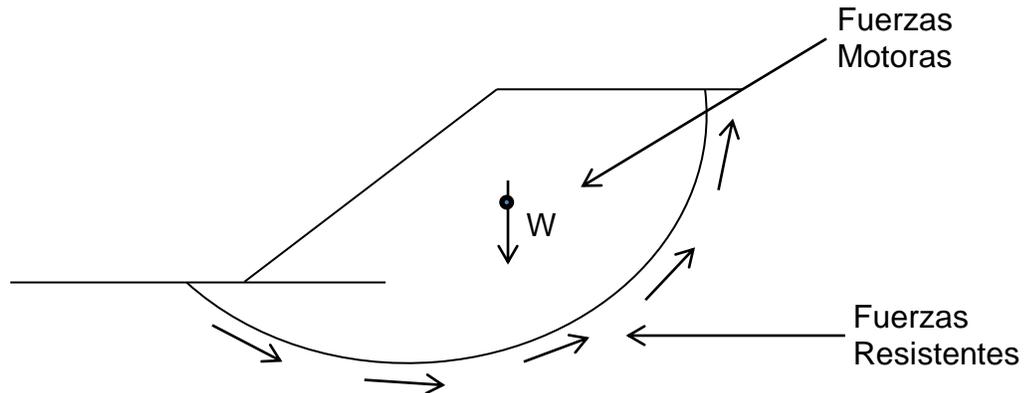


Figura 3. Esquema de fuerzas actuantes en un talud

En la Figura 3 se muestra las fuerzas actuantes que mantienen en equilibrio a un talud, sin tomar en cuenta cargas externas estáticas como, el peso del agua y su efecto en el esfuerzo efectivo, y dinámicas como, una carga sísmica.

2.2.6 Estabilidad de taludes

En toda obra de infraestructura lineal o cualquier construcción que requiera una superficie plana en una zona de pendiente, requieren de la formación o excavación de un talud. La estabilidad de talud viene dada en la mayoría de los casos a proyectarse a largo plazo, sin embargo, existen excepciones como en la minería donde se proyecta a mediano o corto plazo, ya que solo se requiere la estructura por el tiempo de explotación de la mina o yacimiento. La estabilidad de taludes viene dada al comparar las fuerzas que estabilizadoras manteniéndolo en la misma posición y forma, con las fuerzas que ayudan a desestabilizar el talud. Es indispensable el conocimiento geológico, hidrogeológico y geomecánico del macizo rocoso o del suelo, además de conocer los factores externos que actúan sobre el terreno, ya que determinan el comportamiento de los materiales, sus modelos, y mecanismos de deformación y rotura.

2.2.7 Métodos de análisis de estabilidad

Se fundamenta en un planteamiento físico-matemático donde intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud. González, Ferrer, Ortuño y Oteo (2002) consideran 2 métodos generales:

- *Métodos determinísticos*: conocidas o supuestas las condiciones donde se encuentra un talud, estos métodos indican si el talud es o no estable. Consiste en seleccionar los valores adecuados de los parámetros físicos y resistentes que controlan el comportamiento del material para, a partir de ellos y de las leyes de comportamiento adecuadas, definir el estado de estabilidad o el factor de seguridad del talud. Existen dos grupos: método de equilibrio límite y método tenso-deformacionales.

- *Métodos Probabilísticos*: consideran la probabilidad de rotura de un talud bajo unas condiciones determinadas. Es necesario conocer las funciones de distribución de los diferentes valores considerados como, variables aleatorias en los análisis (lo que se supone su mayor dificultad por la gran cantidad de datos necesarios, dadas las incertidumbres sobre las propiedades de los materiales), realizándose a partir de ellas, los cálculos del factor de seguridad mediante procesos iterativos. Se obtienen las funciones de densidad de probabilidad y distribución de probabilidad del factor de seguridad, y curvas de estabilidad del talud, con el factor de seguridad asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia.

2.2.8 Taludes en suelos

Existen diferentes métodos clásicos para el análisis de estabilidad en suelos y son los siguientes:

- Análisis de roturas planas.
- Análisis de diferentes bloques de terreno que interactúan entre sí (método de las cuñas).

- Análisis del equilibrio total de una masa deslizante, de desarrollo circular o logarítmico, para análisis de roturas curvas.

2.2.9 Métodos de rebanadas

2.2.9.1 Método de Bishop

Este método permite analizar la estabilidad de un talud en dos dimensiones. El volumen que se simplifica en área, que está sobre la línea de rotura, se divide en un número de rebanadas, y se obtiene el equilibrio mecánico de cada una para determinar las fuerzas que actúan sobre cada rebanada. El método de Bishop intenta mejorar el de las rebanadas tomando en cuenta ciertas hipótesis.

Dichas hipótesis las explica González, Ferrer, Ortuño y Oteo (2002) así:

- Se supone una curva de rotura circular.
- La masa deslizante se divide en n rebanadas o fajas verticales.
- Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo.
- De la condición de equilibrio de fuerzas verticales en cada rebanada se obtienen las fuerzas N (normales a la curva de rotura) y se sustituyen en la ecuación resultante de equilibrio de momentos.
- El método de Bishop modificado (el más conocido y utilizado) supone, además, que las fuerzas de contacto entre cada dos rebanadas no influyen, por estar equilibradas.
- Se obtiene, así, la expresión del factor de seguridad, FS , de la superficie considerada.

2.2.9.2 Método de Fellenius

Fellenius divide la supuesta cuña de deslizamiento en rebanadas, estudiando el estado de fuerzas de cada una de ellas. La condición de equilibrio de cada rebanada vendrá dada por la superioridad de las fuerzas

estabilizadoras sobre las fuerzas desestabilizadoras en la superficie de deslizamiento.

Fuerzas estabilizadoras (S) > Fuerzas desestabilizadoras (T)

Las fuerzas estabilizadoras (S) están compuestas por las fuerzas de cohesión y rozamiento interno del terreno. Esta fuerza se ve definida por la fuerza de rozamiento y por la fuerza de cohesión, representada en la ecuación 3.

$$S = FR + FC = P \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi + Cx \frac{\Delta x}{\cos \alpha} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}$$

Donde FR representa las fuerzas de rozamiento interno del terreno, FC las fuerzas de cohesión, P es la carga sobre la curva de rotura, α es el ángulo que forman la curva de rotura con la horizontal, ϕ es el ángulo de rozamiento interno del terreno, C es la cohesión, Δx es el ancho de la rebanada, α es el ángulo entre la rotura y la horizontal.

Las fuerzas desestabilizadoras (T) se identifican con la componente tangencial de las cargas sobre la curva de rotura; según la ecuación 4.

$$T = P \cdot \sin \alpha = (W + q \cdot \Delta x) \cdot \sin \alpha = (\gamma \cdot A + q \cdot \Delta x) \cdot \sin \alpha \dots \dots \dots \text{Ecuación 4}$$

Donde, γ es el peso unitario del suelo, A es la superficie de la cuña de terreno que forma la rebanada, q es la carga externa.

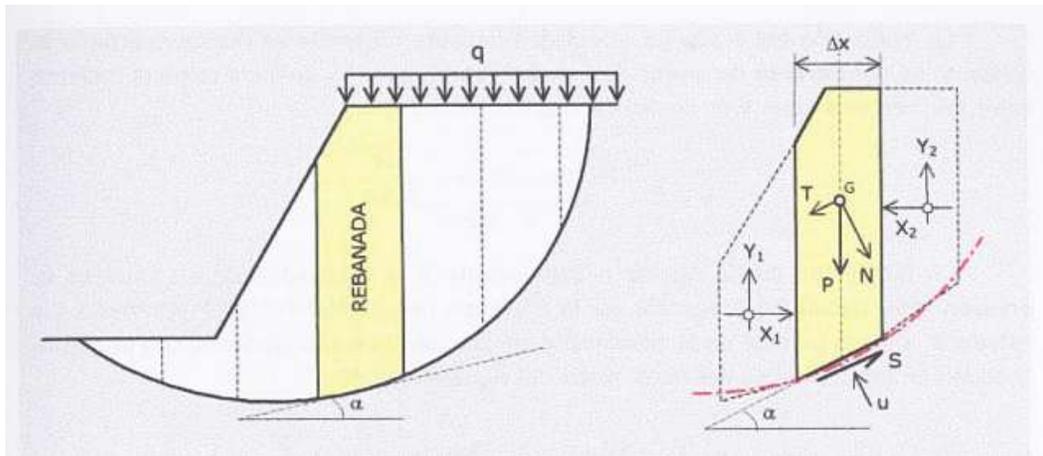


Figura 4. Estado de fuerzas actuantes sobre una superficie de terreno por método de Fellenius. Tomada de Luis Bañon Blazquez (2015).

En la Figura 4 se puede observar las fuerzas actuantes sobre una supuesta superficie de terreno, así como también las rebanadas en las que se puede dividir una cuña. Este método no toma en cuenta las fuerzas de interacción entre rebanadas, ya que las considera de pequeña magnitud o que se anulan entre sí.

2.2.9.3 Método de Janbú

Janbú (1973) presenta un método de dovelas para curvas de rotura, no circulares.

De acuerdo con Janbú (ecuación 5):

$$FS = \frac{f_0 \cdot \Sigma [C \cdot b + (W - ub) \tan \phi]}{\Sigma W \cdot \tan \alpha} \cdot \frac{1}{\cos \alpha \cdot ma} \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

b = Ancho de la dovela

W = Peso de cada dovela

u = Presión de poros en la base de cada dovela.

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela

C = Cohesión.

ϕ = ángulo de fricción interna.

m = módulo de Janbú (depende del tipo de suelo y su densidad)

a = aceleración de la gravedad.

Donde f_0 depende de la curvatura de la superficie de rotura (Figura 5)

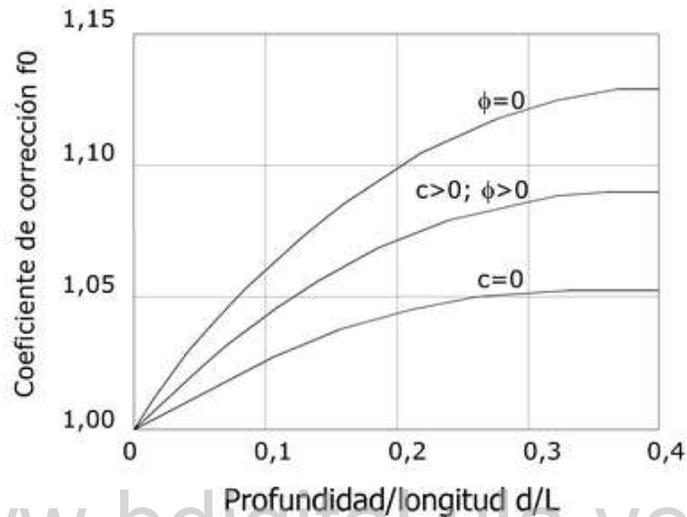


Figura 5. Diagrama para determinar el factor f_0 para el método de Janbú.

Tomada de <https://www.google.co.ve/imgres?imgurl=http%3A%2F%2F>

Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobre-determinada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección f_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.

2.2.9.4 Método de Morgenstern y Price

Este método asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas.

La suposición de funciones diferentes tiene muy poco efecto sobre el cálculo de factor de seguridad cuando se satisface el equilibrio estático. El

método de Morgenstern y Price, es un método muy preciso, prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo. (Suarez, 2009)

Para la aplicación de algunos métodos de estabilidad de talud, es necesario estudiar cada talud como una sola masa homogénea y no de distintos estratos como ocurre en la realidad y la aproximación se obtiene según Duncan, Buchignani y Marius (1987), con la realización de cálculos promedios entre las diferentes capas de cada talud en los siguientes parámetros: cohesión, coeficiente de fricción, y peso unitario (según ecuaciones 6, 7 y 8).

$$C_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n R \cdot C_i \cdot \theta_i}{\sum_{i=1}^n R \cdot \theta_i} \dots\dots\dots Ecuación 6$$

$$\phi_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n R \cdot \phi_i \cdot \theta_i}{\sum_{i=1}^n R \cdot \theta_i} \dots\dots\dots Ecuación 7$$

$$\gamma_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n R \cdot \gamma_i \cdot \theta_i}{\sum_{i=1}^n R \cdot \theta_i} \dots\dots\dots Ecuación 8$$

C_i = Cohesión de cada capa

ϕ_i = Ángulo de fricción de capa

γ_i = Peso unitario de cada capa

R = Radio de la curva de rotura circular (ver Figura 28)

2.2.10 Teoría del colapso

Úcar y Belandria (2016) han desarrollado y chequeado todas las ecuaciones propuestas por Jung Chang, Chen, y P. Yao (1984) a continuación se muestra dicho desarrollo.

2.2.10.1 Teoría del colapso para la rotura espiral logarítmica

El movimiento de mecanismo de rotura es un tipo traslacional. En la Figura 6 se muestra los parámetros necesarios de un talud para aplicar la teoría del colapso ilustrándose el mecanismo de rotura rotacional espiral logarítmica. La region ABC rota como un cuerpo rígido con respecto al centro de rotación O, con una velocidad angular Ω , vinculado con los materiales debajo de la curva de rotura Logarítmica AC. Los parámetros, H, θ_0 y θ_h son usados para especificar el mecanismo de rotura.

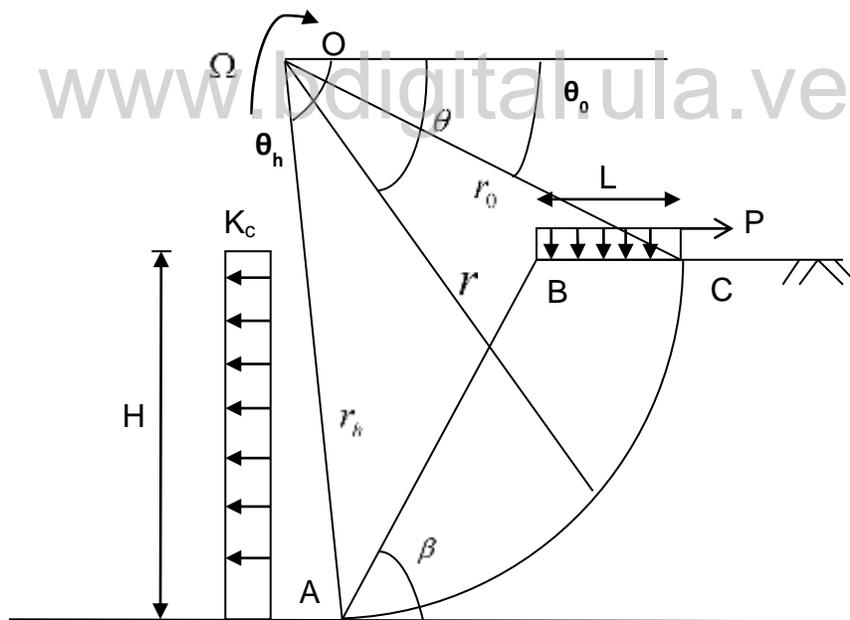


Figura 6. Parámetros necesarios en un talud para aplicar la teoría del colapso para la rotura espiral logarítmica

Para la aplicación de la teoría de colapso es necesario conocer la rotura mas probable y los parámetros que la caracterizan.

La Energía de disipación interna a lo largo de la curva de rotura se expresa a través de:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_h} (c.V.\cos\phi) \cdot \frac{r.d\theta}{\cos\phi} = \frac{c.r_0^2.\Omega}{2\tan\phi} \left\{ \exp[2(\theta_h - \theta_0)\tan\phi] - 1 \right\}$$

$$= c.r_0^2.\Omega.f_c \dots \dots \dots \text{Ecuación 9}$$

$$f_c = \frac{\left\{ \exp[2(\theta_h - \theta_0)\tan\phi] - 1 \right\}}{2\tan\phi}$$

Donde: “*r*” es el radio desde el centro “O” hasta la rotura, “*c*” la cohesión del material, “ θ_0 ” y “ θ_h ” son los ángulos entre la horizontal y los alineamientos que van desde el centro “O” hasta la intersección superior de la rotura con la cara externa del talud y la inferior respectivamente, “ ϕ ” es el ángulo de fricción, “ Ω ” representa la velocidad angular, vinculado con los materiales del talud, H es la altura del talud, L es la distancia en metros desde el borde del talud hasta el corte de la rotura con la cresta del talud.

La Tasa de trabajo externa debida a el peso del suelo para la region de rotura puede ser encontrada por simple suma algebraica $W_1 - W_2 - W_3$, en las cuales W_1, W_2 , y W_3 son las tasas de trabajo hechas por el peso del material en las regiones OAC, OBC, y OAB respectivamente.

$$W_1 = \frac{\gamma.r_0^2.\Omega}{3(1+9\tan^2\phi)} \left\{ (3\tan\phi\cos\theta_h + \sin\theta_h) \exp[3(\theta_h - \theta_0)\tan\phi] - 3\tan\phi\cos\theta_0 - \sin\theta_0 \right\} = \gamma.r_0^2.\Omega.f_1 \dots \dots \dots \text{Ecuación 10}$$

$$f_1 = \frac{\{(3 \tan \phi \cos \theta_h + \sin \theta_h) \exp[3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] - 3 \tan \phi \cos \theta_0 - \sin \theta_0\}}{3(1 + 9 \tan^2 \phi)}$$

$$W_2 = \frac{\gamma \cdot r_0^2 \cdot \Omega}{6} \cdot \frac{L}{r_0} \left(2 \cos \theta_0 - \frac{L}{r_0} \right) \sin \theta_0 = \gamma \cdot r_0^2 \cdot \Omega \cdot f_2 \dots \dots \dots \text{Ecuación 11}$$

$$f_2 = \frac{\frac{L}{r_0} \left(2 \cos \theta_0 - \frac{L}{r_0} \right) \sin \theta_0}{6}$$

$$W_3 = \frac{\gamma \cdot r_0^2 \cdot \Omega}{6} \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] \left[\sin(\theta_h - \theta_0) - \frac{L}{r_0} \sin \theta_h \right]$$

$$\left\{ \cos \theta_0 - \frac{L}{r_0} + \cos \theta_h \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] \right\}$$

$$= \gamma \cdot r_0^2 \cdot \Omega \cdot f_3 \dots \dots \dots \text{Ecuación 12}$$

$$f_3 = \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] \left[\sin(\theta_h - \theta_0) - \frac{L}{r_0} \sin \theta_h \right]$$

$$\left\{ \cos \theta_0 - \frac{L}{r_0} + \cos \theta_h \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] \right\} / 6$$

La Tasa de trabajo externa por la fuerza de inercia debida a el peso del material para la region de falla puede ser encontrada por $W_4 - W_5 - W_6$, en las cuales W_4, W_5 , y W_6 son las tasas de trabajo hechas por las fuerzas de inercia del peso del material en las regiones OAC, OBC, y OAB respectivamente.

$$W_4 = \frac{\gamma \cdot r_0^3 \cdot \Omega \cdot K_c}{3(1+9 \tan^2 \phi)} \left\{ (3 \tan \phi \sin \theta_h - \cos \theta_h) \exp[3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] - \right. \\ \left. 3 \tan \phi \sin \theta_0 + \cos \theta_0 \right\} = K_c \cdot \gamma \cdot r_0^3 \cdot \Omega \cdot f_4 \dots \dots \dots \text{Ecuación 13}$$

$$f_4 = \left\{ (3 \tan \phi \sin \theta_h - \cos \theta_h) \exp[3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] - \right. \\ \left. 3 \tan \phi \sin \theta_0 + \cos \theta_0 \right\} / 3(1+9 \tan^2 \phi)$$

$$W_5 = \frac{K_c \cdot \gamma \cdot r_0^3 \cdot \Omega}{6} \cdot \frac{L}{r_0} \cdot 2 \cdot \sin \theta_0 \cdot \sin \theta_0 = K_c \cdot \gamma \cdot r_0^3 \cdot \Omega \cdot f_5 \dots \dots \dots \text{Ecuación 14}$$

$$f_5 = \frac{\frac{L}{r_0} \cdot 2 \cdot \sin \theta_0 \cdot \sin \theta_0}{6}$$

$$W_6 = \frac{K_c \cdot \gamma \cdot r_0^3 \cdot \Omega}{6} \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] \left[\sin(\theta_h - \theta_0) - \frac{L}{r_0} \sin \theta_h \right]$$

$$\sin \theta_0 + \sin \theta_h \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] = K_c \cdot \gamma \cdot r_0^3 \cdot \Omega \cdot f_6 \dots \dots \dots \text{Ecuación 15}$$

$$f_6 = \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] \left[\sin(\theta_h - \theta_0) - \frac{L}{r_0} \sin \theta_h \right] \\ \sin \theta_0 + \sin \theta_h \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] / 6$$

La tasa de trabajo externa debido a sobrecarga externa y sus fuerzas de inercia son:

$$p \cdot L \cdot \Omega \left(r_0 \cdot \cos \theta_0 - \frac{L}{2} \right) = p \cdot r_0^2 \cdot \Omega \cdot \frac{L}{r_0} \left(\cos \theta_0 - \frac{L}{2r_0} \right) \\ = p \cdot r_0^2 \cdot \Omega \cdot f_p \dots \dots \dots \text{Ecuación 16}$$

$$f_p = \frac{L}{r_0} \left(\cos \theta_0 - \frac{L}{2r_0} \right)$$

$$\begin{aligned} X \cdot K_c \cdot p \cdot L \cdot \Omega (r_0 \cdot \sin \theta_0) &= X \cdot K_c \cdot p \cdot r_0^2 \cdot \Omega \cdot \frac{L}{r_0} \cdot \sin \theta_0 \\ &= X \cdot K_c \cdot p \cdot r_0^2 \cdot \Omega \cdot f_q \dots \dots \dots \text{Ecuación 17} \end{aligned}$$

$$f_q = \frac{L}{r_0} \cdot \sin \theta_0$$

Donde P es el valor de sobrecarga y X es un coeficiente el cual puede ser mayor o menor que la unidad. Igualando la tasa de energía de disipación interna con la externa se obtiene:

$$K_c = \frac{c \cdot f_c - \frac{\gamma (f_1 - f_2 - f_3) \cdot H}{\sin \theta_h \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \phi]} - p \cdot f_p}{\frac{\gamma (f_4 - f_5 - f_6) \cdot H}{\sin \theta_h \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \phi]} + X \cdot p \cdot f_4} \dots \dots \dots \text{Ecuación 18}$$

Calculando la derivada en la ecuación 21 con respecto a θ_0 y θ_h , e igualándola a cero así:

$$\frac{\partial K_c}{\partial \theta_0} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial K_c}{\partial \theta_h} = 0 \dots \dots \dots \text{Ecuación 19}$$

Entonces, realizando dichas derivadas de la ecuación 19, se obtiene los valores críticos de θ_0 y θ_h . Sustituyendo estos nuevos valores de θ_0 y θ_h en la ecuación 18 se obtiene el mínimo valor de K_c , el cual es el coeficiente sísmico horizontal que hace colapsar el determinado talud en estudio por el método de rotura espiral logarítmica.

2.2.10.2 Teoría del colapso para la rotura plana

El tipo de rotura plana se muestra en la Figura 7. El área ABC se mueve como un cuerpo rígido con una velocidad relativa con respecto a otro cuerpo rígido ubicado debajo de la superficie AC. La rotura plana termina en el punto A, con una altura H. Este mecanismo de rotura puede depender de dos variables H y θ_p .

Igualando la tasa de trabajo interna con la externa, se obtiene que el límite superior de K_c es:

$$K_c = \frac{\frac{C \cdot \cos \phi \cdot \text{sen} \beta}{\text{sen}(\beta - \theta_p) \cdot \cos(\theta_p - \phi)} - P \cdot \tan(\theta_p - \phi) - H \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot \tan(\theta_p - \phi)}{H \cdot \frac{\gamma}{2} + PX}$$

.....Ecuación 20

En la cual XK_c = el factor de aceleración límite correspondiente a la sobrecarga P, magnitud la cual puede ser relacionada con el factor de aceleración límite del peso del suelo K_c por el coeficiente X, el cual puede ser mayor o menor que la unidad. El factor de aceleración límite K_c tiene el valor mínimo cuando θ satisface la siguiente condición:

$$\frac{\partial K_c}{\partial \theta_p} = 0 \dots \dots \dots \text{Ecuación 21}$$

Realizando la derivada de la ecuación 21 y sustituyendo el valor de θ_p se obtiene así en la ecuación 20 el límite superior mínimo para el factor de aceleración límite para el mecanismo de rotura plana.

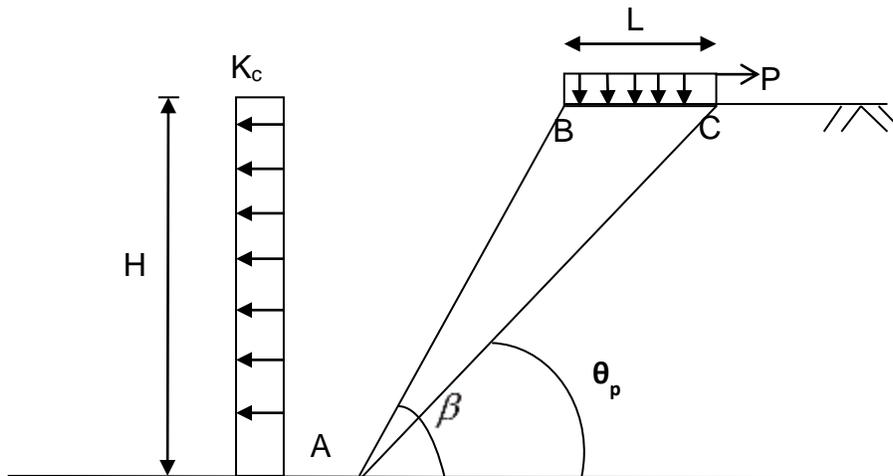


Figura 7. Parámetros necesarios en un talud para aplicar la teoría del colapso para la rotura plana.

2.2.11 Cálculo Variacional

Según Belandria (2015)

“El cálculo de variaciones proporciona procedimientos matemáticos para encontrar que la forma de la curva sea un extremal. Es decir, la curva que maximiza o minimiza el valor de la integral a lo largo de la curva, con determinadas condiciones de contorno. Por lo tanto, al aplicar el mencionado método matemático (cálculo variacional) conjuntamente con las condiciones de equilibrio estático a lo largo de la línea potencial de rotura, y formuladas en forma de integrales con ciertas condiciones de contorno, es posible minimizar dichas integrales, y, por ende, determinar la superficie extrema que resulta en el mínimo factor de seguridad del talud. El método es exacto en el sentido de que todas las ecuaciones de equilibrio son satisfechas.

A continuación se presentan las ecuaciones requeridas para analizar la estabilidad aplicando la técnica del cálculo de variaciones, donde se consideran las tres ecuaciones de equilibrio conjuntamente con la condición de transversalidad, obteniéndose un sistema de ecuaciones no lineales, en la cual el factor de seguridad y las tensiones normales actuando sobre la superficie potencial de rotura deben obtenerse a través de métodos numéricos. Por otra parte, la estabilidad se analiza en terrenos no homogéneos, lo que indica que los parámetros de corte dentro del dominio analizado varían en función del tipo de suelo o macizo

rocoso. Adicionalmente, se tiene en cuenta el efecto sísmico, presión intersticial y sobrecarga"

La Figura 8 muestra los parámetros necesarios para la aplicación del método de cálculo variacional, donde σ es la tensión normal a la curva de rotura, $\tau = \tau(x)$ es la tensión tangencial actuando sobre $y(x)$, ds es el diferencial de longitud de la curva potencial, q es la sobrecarga, x_c y y_c , es un centro geométrico que depende de los multiplicadores de Lagrange (λ_1 y λ_2), $g(x)$ es la función de la superficie del talud, $y(x)$ es la función de la curva de rotura.

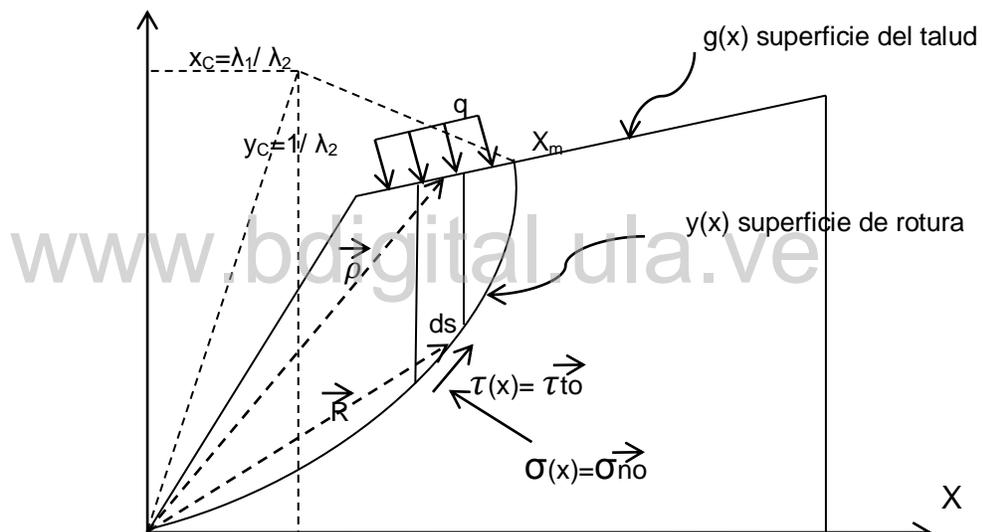


Figura 8. Parámetros, involucrados en el talud aplicando cálculo variacional

Para la aplicación del cálculo de variaciones se realiza la programación en el software Maple en el que se introducen diferentes subrutinas y programaciones, donde: n y r , representa el número de rebanadas en que se subdivide la masa deslizante, d , es un parámetro utilizado para las dos primeras rebanadas y es igual a $r-2$, hb , es la constante de integración, Δx , el ancho de la rebanada, Ψ , es el coeficiente de fricción ($\tan \phi$), pu , es el peso unitario.

El presente método de Cálculo Variacional se resuelve por métodos numéricos a través del programa Maple.

A continuación se presentan las expresiones a introducir en el programa:

1. Sumatoria de las fuerzas horizontales, aplicando la integración numérica compuesta para "n" rebanadas se expresa de la siguiente manera:

for n from 3 by 1 to r do

$$f_1 = f_1 + hb \left(C + \sigma_n \Psi - FS \sigma_n \left(\frac{1}{2\Delta x} \right) (3y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}) \right)$$

if n > d then

$$f_1 = f_1 + hb \left(C + \sigma_{n-d} \Psi - FS \sigma_{n-d} \left(\frac{1}{2\Delta x} \right) (-3y_{n-d} + 4y_{n-d+1} - y_{n-d+2}) \right)$$

end if

end do.....Ecuación 22

2. La sumatoria de fuerzas verticales aplicando la técnica de integración compuesta con "n" rebanadas, queda:

con "n" rebanadas, queda :

for n from 3 by 1 to r do

$$f_2 = f_2 + hb \left(\begin{array}{l} (C + \sigma_n \Psi) \left(\frac{1}{2\Delta x} \right) (3y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}) \\ + FS \sigma_n - FS pu (g_n - y_n) \end{array} \right)$$

if n > d then

$$f_2 = f_2 + hb \left(\begin{array}{l} (C + \sigma_{n-d} \Psi) \left(\frac{1}{2\Delta x} \right) (-3y_{n-d} + 4y_{n-d+1} - y_{n-d+2}) \\ + FS \sigma_{n-d} - FS pu (g_{n-d} - y_{n-d}) \end{array} \right)$$

end if

end do.....Ecuación 23

3. La sumatoria de los momentos aplicando la técnica de integración, considerando "n" rebanadas:

www.bdigital.ula.ve

for n from 3 by 1 to r

$$do f_3 = f_3 + hb \left(\begin{array}{l} (C + \sigma_n \Psi) \left(y_n - x_n \left(\frac{1}{2\Delta x} \right) \right) (3y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}) \\ -FS \sigma_{n-d} \left(x_{n-d} - y_{n-d} \left(\frac{1}{2\Delta x} \right) \right) (-3y_{n-d} + 4y_{n-d+1} - y_{n-d+2}) \\ +FS x_n pu (g_n - y_n) \end{array} \right)$$

if n > d then

$$f_3 = f_3 + hb \left(\begin{array}{l} (C + \sigma_{n-d} \Psi) \left(y_{n-d} - x_{n-d} \left(\frac{1}{2\Delta x} \right) \right) (-3y_{n-d} + 4y_{n-d+1} - y_{n-d+2}) \\ -FS \sigma_n \left(x_n - y_n \left(\frac{1}{2\Delta x} \right) \right) (3y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}) \\ +FS x_{n-d} pu (g_{n-d} - y_{n-d}) \end{array} \right)$$

end if

end do.....Ecuación 24

4. La integración de las ecuaciones de Euler, para "n" rebanadas, queda:

for n from 3 by 1 to r do

$$f_{n+1} = \left(\begin{array}{l} (\Psi(y_n - y_c) + FS(x_n - x_c) \left(\frac{3\sigma_n - 4\sigma_{n-1} + \sigma_{n-2}}{3y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}} \right)) \\ -(x_n - x_c) FS pu + 2(C + \sigma_n \Psi) \end{array} \right)$$

end do.....Ecuación 25

Otra característica importante de resaltar es que la ecuación de Euler genera tantas ecuaciones como rebanadas se divida la masa que tiende al deslizamiento. De esta manera si se tiene en cuenta que la masa deslizante se divide en cuatro rebanadas la programación en Maple arroja cuatro ecuaciones. Finalmente se resuelve el sistema de ecuaciones no lineales mediante el comando “fsolve”.

2.2.12 Retiro

Es la distancia mínima que debe existir entre un lindero de una parcela y la correspondiente edificación ubicada en ella. La reglamentación de los retiros regula las separaciones entre la edificación a construir en la parcela y los linderos de esta, tanto de la vía pública como de las construcciones contiguas.

Para la presente investigación la definición de retiro es la distancia mínima entre el borde de la terraza o cresta del talud y el lindero de una parcela o estructura, como se muestra en la Figura 9. Esta distancia mínima se interpreta como la distancia que no debe ser habitada, ni ocupada por alguna estructura o vialidad, ya que esta se obtiene de un estudio y análisis de estabilidad del talud, y por lo tanto ilustra una distancia con alta amenaza, que pone en riesgo lo que en ella se funde o habite.

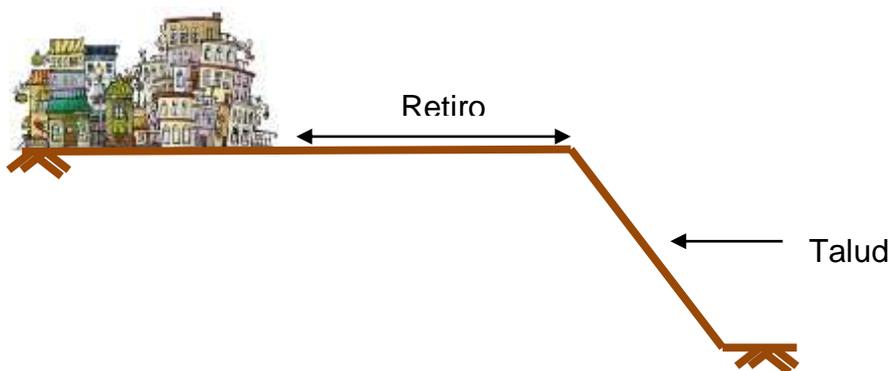


Figura 9. Ilustración de concepto de distancia de retiro en el borde de la terraza

El retiro del talud de la meseta es de 1/3 de la altura del talud o un estudio de la estabilidad de taludes según Gaceta Oficial República Bolivariana de Venezuela, Municipio Libertador, Estado Mérida, (2008).

2.2.13 Vulnerabilidad

Varnes (1984), la define como:

“La vulnerabilidad es el grado de pérdida o destrucción de un elemento señalado o de un grupo de elementos en riesgo, como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de magnitud determinada. (El grado de daño a la población, vidas humanas, propiedades, actividades económicas, servicios públicos, condiciones ambientales, entre otros, en un área específica por la ocurrencia de un determinado evento)”.

Suarez (2009) la define como: El grado de probabilidad de pérdida de un determinado elemento o grupo de elementos dentro del área afectada por el deslizamiento, se expresa en una escala de 0 (no pérdida) a 1 (pérdida total), tal como se refleja en la Tabla 2, dando valores de cero (0) para una condición donde no hay personas afectadas y como valor máximo de uno (1) cuando el porcentaje de personas muertas o discapacitadas es mayor al 50%.

Tabla 2. Valores de vulnerabilidad social o humana (Imiriland, 2007)

Descripcion de Vulnerabilidad	Índice
No hay personas afectadas	0
Se requiere evacuar personas, pero no hay personas heridas	0.25
Personas heridas, pero las personas continúan en sus actividades	0.5
Personas seriamente heridas, hasta con el 50% de discapacidad	0.75
Personas muertas. 51 a 100% de discapacidad	1

La Tabla 2 expresa los índices de vulnerabilidad por daño a personas si existiese un deslizamiento o colapso de un talud.

Tabla 3. Valores de vulnerabilidad física al impacto de deslizamientos de tierra (Imiriland, 2007)

Descripcion de Vulnerabilidad	Rango de Pérdidas	Índice
Estructuras intactas	0	0
Daños locales	1+25%	0.25
Daños serios pero posibles de reparar	26+50%	0.5
Destruído en su mayoría y difícil de reparar	51+75%	0.75
Destrucción total	76+100%	1

La Tabla 3 expresa los índices de vulnerabilidad por daño a estructuras si existiese un deslizamiento o colapso de un talud.

Tabla 4. Valores de vulnerabilidad económica debida a la interrupción de una carretera por deslizamientos de tierra. (Imiriland, 2007)

Descripcion de Vulnerabilidad	Índice
No hay interrupciones en las actividades económicas.	0
Interrupciones cortas, temporales. Desde horas hasta un día.	0.25
Interrupciones temporales de días, hasta una semana.	0.5
Interrupciones temporales largas, de semanas a meses.	0.75
Interrupción permanente.	1

La Tabla 4 expresa los índices de vulnerabilidad por daño a vías de comunicación si existiese un deslizamiento o colapso de un talud.

2.2.14 Amenaza

Es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructor, en un área específica dentro de un determinado período de tiempo.

Suarez (2009), la define:

“La amenaza es una condición con el potencial de causar una consecuencia indeseable. Una descripción de amenaza a deslizamientos debe incluir las características de éstos, el volumen o áreas de los movimientos, las profundidades, las velocidades y su probabilidad de ocurrencia. La amenaza es la probabilidad de que ocurra un deslizamiento particular en un determinado tiempo”.

Tabla 5. Escalas recomendadas para la zonificación de amenaza por deslizamientos (Suarez, 2009).

Amenaza	Factor de seguridad estático	Factor de seguridad dinámico $K_h = 0.5 A$
BAJA	Mayores a 1.5	Mayores de 1.15
MEDIA	1.2 a 1.5	1.0 a 1.15
ALTA	Menores a 1.2	Menores de 1.0

La Tabla 5 indica el grado de amenaza según el tipo de evento detonante, ya que puede ser evaluado para un evento sísmico o simplemente con cargas estáticas.

2.2.15 Riesgo

Riesgo es el número esperado de vidas humanas perdidas, personas heridas, daño a la propiedad y pérdidas económicas y ambientales, relacionadas con la ocurrencia de un determinado fenómeno (Varnes 1984). En la práctica, el riesgo está definido por la magnitud de las consecuencias de la amenaza (Suarez 2009).

El riesgo se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad}$$

La construcción de mapas de riesgo se puede realizar por diferentes métodos, el que se usa en la presente investigación consiste en superponer el mapa de vulnerabilidad con el de amenaza y así obtener las áreas de mayor riesgo.

2.2.16 Spline

En el subcampo matemático del análisis numérico, un spline es una curva diferenciable definida en porciones mediante polinomios.

En los problemas de interpolación, se utiliza a menudo la interpolación mediante splines porque da lugar a resultados similares requiriendo solamente el uso de polinomios de bajo grado, evitando así las oscilaciones, indeseables en la mayoría de las aplicaciones, encontradas al interpolar mediante polinomios de grado elevado.

Para el ajuste de curvas, los splines se utilizan para aproximar formas complicadas. La simplicidad de la representación y la facilidad de cómputo de los splines los hacen populares para la representación de curvas en informática, particularmente en el terreno de los gráficos por ordenador. Tomado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Spline>

Se emplea funciones spline en la presente investigación con el fin de obtener una línea de retiro continua con pocas oscilaciones en los mapas a realizar.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 3

MARCO METODOLÓGICO

La metodología de acuerdo con Pardinás (citado por Finol y Camacho, 2012) se refiere “al estudio crítico del método” (p.62). Aun cuando Palella y Martins (2012) consideran que:

Desde el punto de vista semántico, el término significa tratado del método. Como tal se entiende una guía procedimental, producto de la reflexión, que provee pautas lógicas generales pertinentes para desarrollar y coordinar operaciones destinadas a la consecución de objetivos intelectuales o materiales del modo más eficaz posible”. (79).

De esta manera, a partir del marco metodológico, es posible conocer la naturaleza de la investigación, su diseño, tipo, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, que en la definitiva llevarán a dar respuesta de manera ordenada y sistemática a las interrogantes planteadas.

3.1. Tipo de Investigación

En la investigación científica, de acuerdo a lo expresado por Risquez, Fuenmayor y Pereira (citado por Pelekais y Raspa, 2016), el tipo de investigación está referido a la ubicación de la investigación en las diferentes categorías de clasificación, es decir, hace referencia al nivel de profundidad del conocimiento, siempre de acuerdo a la estrategia que se emplee, el método utilizado y el carácter de la investigación.

Por tanto, esta investigación es exploratoria porque indaga sobre fenómenos poco conocidos sobre los cuales existe poca información, con el fin de explorar la situación. Al respecto, Hurtado (2016) señala: “El objetivo de una investigación explorativa es identificar aspectos para definir mejor

algún evento, además de facilitar herramientas e instrumentos necesarios para estudios posteriores más precisos” (p. 98).

En consecuencia, el investigador empleo tres (3) métodos de manera ordenada como estructura con principios coherentemente concatenados para el análisis respectivo. El Método de Equilibrio Límite estudia la estabilidad del talud mediante el programa Slide en estado seco, saturado y sísmico, `por rotura circular analiza los diferentes modelos de talud. El Método de la Teoría de Colapso, estudia la estabilidad del talud mediante el programa Maple, utilizando la rotura espiral logarítmica, rotura plana y rotura circular. Finalmente el Método de Cálculo Variacional estudia la estabilidad de talud por rotura circular y plana. Estos métodos permiten obtener diferentes resultados del retiro del borde de la terraza de Mérida, valores de factor de seguridad de cada modelo, y determinar así la vulnerabilidad geotécnica que actualmente vive la misma, conllevando a la realización de los mapas de retiro, vulnerabilidad, amenaza y riesgo geotécnico.

3.2. Nivel y diseño de investigación

En lo que se refiere al nivel de investigación, Arias (2012) señala que, el mismo está referido “al grado de profundidad con que se aborda un objeto o fenómeno” (p. 47). El tipo de investigación a realizar determina los niveles que es preciso desarrollar. En este sentido, el problema que se estudió tuvo un nivel descriptivo, tomando en cuenta que el propósito de este nivel es el de interpretar realidades de hechos. Por lo que incluye descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, composición o procesos de los fenómenos. Significando que desde el nivel descriptivo fue posible hacer énfasis sobre conclusiones dominantes o sobre como una persona, grupo o cosa se conduce o funciona en el presente.

En este sentido, Arias (2012) señala que este nivel de investigación “consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento, mide (n) de forma independiente

las variables” (p. 19). En los términos antes mencionados, el presente trabajo de grado se fundamentó en los escenarios y las características propias que presenta la determinación del grado de vulnerabilidad y construir mapas de retiro, vulnerabilidad, amenaza y riesgo geotécnico para el uso humano del área de la terraza más cercana al borde.

En relación al diseño es la fase en que el investigador muestra la manera, el procedimiento operativo que aplicó para recoger la información. Según Pérez (2012) “El diseño, es pues, una estrategia general de trabajo que el investigador determina una vez que ya ha alcanzado suficiente claridad respecto a su problema y que orienta y esclarece la etapas que habrán de acometerse posteriormente. (p.22). En este orden de ideas, el diseño de este estudio surge directamente de los objetivos planteados en la investigación.

En este contexto, este estudio se enmarca primeramente en un diseño documental porque se apoya de una data de información emanado por FUNVISIS, la cual consta de las velocidades de onda P y S, densidad y espesor de cada capa, con su respectiva ubicación y lugar de referencia. Al respecto, Arias (2012) señala “La investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales, impresas, audiovisuales e electrónicas” (p.27).

Por lo que se realizó una revisión inicial de los antecedentes de estudios relacionados con el estudio para tener un sustento teórico y que sirvió como referencia para el análisis e interpretación de los resultados. Luego, se evaluó la vulnerabilidad geotécnica del borde de la meseta de la ciudad de Mérida, estudiando los modelos de talud con mayor área de vulnerabilidad y riesgo, la distancia de retiro, mediante el método de equilibrio límite en estado saturado, con carga sísmica y la teoría de colapso utilizando por rotura espiral logarítmica.

Asimismo, es un diseño estadístico, porque efectúa mediciones para determinar los valores de variables, consistente en el paradigma cuantitativo, es decir, una evaluación numérica que es establecida mediante la estadística. Según Tamayo y Tamayo (2007) argumenta que el diseño estadístico es cuando se hacen mediciones para definir los valores de una variable o un de variables. Consistente en el estudio cuantitativo o numeración numérica de hechos colectivos. (p.110). Sin embargo, Hurtado (2016) señala que la investigación cuantitativa es:

Un medio o mecanismo para lograr precisión a través de la simbolización numérica, sobre todo, en aquellas investigaciones cuyo evento de estudio permite la cuantificación o cuando el interés del investigador es estimular magnitudes, intensidades, frecuencias o duraciones. (p. 25).

Por tanto, este estudio se apoya del paradigma cuantitativo porque utiliza datos ya existentes para iniciar su proceso de investigación. Por lo que el tratamiento estadístico parte de la frecuencia simple (número de frecuencia de los datos e información y porcentaje) del dato e información de cada una de las variables que conforma el problema objeto de estudio. Una vez obtenido el dato, se tabuló, ordenó y se procesó de acuerdo al tratamiento estadístico que se determinó, considerando también la base tecnológica para su procesamiento.

En consecuencia, se estudió el suelo para obtener las propiedades resistentes que a través de datos sísmicos, se determinó diferentes curvas de rotura del talud, utilizando diferentes métodos; además, se estableció la distancia superficial de retiro del límite de la terraza para la construcción y habitabilidad, por último se construyó mapas de retiro, vulnerabilidad, amenaza y riesgo geotécnico del borde de la terraza de Mérida, analizando las nueve líneas ReMi que representa nueve modelos de talud.

3.3. Población y muestra

La población es la totalidad de objetos o personas, que concuerdan en características comunes, que encuadran en la investigación que se está determinando. En esta perspectiva, Arias (2012) señala:

La población, o en términos más precisos población objetivo, es un conjunto finito e infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Ésta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio. (p.81).

Considerando lo señalado por autor antes mencionado, se puede decir, que la población es el conjunto de elementos que se someten a estudio y son base fundamental para obtener la información, en este caso se considera la población finita, por tanto, se aplicó un muestreo que consiste en seleccionar la misma población para elaborar las conclusiones a partir de la estadística descriptivas. En este contexto, se aplicó un muestreo sistemático, según García y Pascual (2004) señala que “el muestreo sistemático depende fundamentalmente de la estructura de la población que se considera. Las características de esta población van a determinar que proporciona estimaciones buenas y se puede conseguir mayor representatividad” (p.26).

En el caso de este estudio, se consideró, los espesores de las capas, densidad, velocidades de comprensión y corte, coeficiente de balasto, ángulo de fricción estimado, cohesión estimada, determinación de la aplicabilidad de los métodos antes mencionados. Por tanto, el investigador abarcó la totalidad de la población, es decir todos los datos proporcionados por FUNVISIS para estudiar la propiedad básica del suelo al ofrecer firmeza a los cambios de forma o distorsión y al aplicar los métodos seleccionados analizó las roturas planas que presenta. Por tanto, se consideró el 100% de la información siendo representativa para este estudio.

En este orden de ideas, la metodología se basa en el estudio práctico, geotécnico, calculando la estabilidad a lo largo de la terraza de la ciudad de Mérida, específicamente los taludes ubicados en el Río Mucujún y Río Chama. Después de que el investigador definió con claridad la población y la muestra, procedió a determinar la técnica y los instrumentos a utilizar para la recolección de los datos, considerándose el diseño seleccionado para este estudio. En el caso del documental surge de fuentes secundarias. Al respecto, Pérez (2009) señala “La técnica es el procedimiento y el instrumento, la herramienta que utiliza el investigador para registrar y organizar posteriormente la información (p.71).

En este mismo orden de ideas, García (citado por Finol y Camacho, 2008) la técnica es el “Proceso operativo que consiste en obtener y registrar organizadamente la información” (p.74). Así mismo Bizquera (1990), define las técnicas como “aquellos medios técnicos que se utiliza para registrar observaciones y facilitar el tratamiento de las mismas”. (p.28). En correspondencia con lo citado anteriormente, son herramientas que permite que el investigador recolecte los datos necesario sobre un tema determinado.

El presente estudio se llevó a cabo con la técnica del arque bibliográfico que consistió es buscar la información sobre el estudio del suelo con respecto al borde de la terraza y del grado de vulnerabilidad geotécnica que actúa como fundación de todas las estructuras que actualmente existe en la zona mediante antecedentes, estudios investigativos o instituciones que posean data de información, entre otros; el uso fuentes primarias y secundarias mediante la revisión literaria.

En este sentido, Sánchez (2007) señala que el arque bibliográfico “permitirá evaluar en forma critica las investigaciones realizadas, identificar los errores de otros trabajos, seleccionando, clasificando y organizando para después proceder a separar la información al fin de alcanzar los objetivos de la investigación” (p. 65).

Por otro lado, se utilizó la observación estructurada. Según Palella y Martins (2012) se entiende por “observación estructurada o sistemática es la que se realiza con ayuda de elementos técnicos apropiados, tales como fichas, tablas, cuadros, programas, entre otros” (p.118). En este caso, el estudio se llevó a cabo graficando las variables del porcentaje de cada modelo para obtener los espesores de las capas, velocidades de comprensión, el coeficiente de Balasto, el valor de ángulo de fricción interna, valor de cohesión, para cada línea ReMi en estudio desde el primera capa superficial del suelo hasta la quinta o sexta capa determinada.

Asimismo, el factor de seguridad y retiros (ordinario, Bishop, Janbú, Morgenstern) y el retiro en (m), obteniéndose los valores promedios de parámetros de resistentes para los diferentes modelos. En relación a la teoría de colapso utilizado en rotura espiral logarítmica, rotura plana y circular, identificando el H (m), C (kn/m²), γ (kN/m³), ϕ (grados), L (m); por último el cálculo Variacional a la estabilidad de los tabules se utilizó para estudio la rotura circular y plana, obteniéndose el retiro del borde de la terraza de la ciudad de Mérida, empleando los métodos arroja diferentes niveles por cada sector en estudio.

3.3. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

En este punto se describen las distintas operaciones a las que serán sometidos los datos que se obtuvieron: registro, clasificación, tabulación y graficación. Para esto fue necesario definir las técnicas, por un lado, las técnicas lógicas (inducción deducción, análisis-síntesis) y la técnica estadística (descriptiva) que fueron empleadas para revelar y descifrar los datos recolectados.

En ese contexto, Finol y Camacho (2008) expone que el análisis constituye “un proceso mental que consiste en desagregar en partes una totalidad, extrayendo las ideas principales y secundarias, determinando

relaciones, características; todo esto con base a la información obtenida y la técnica de análisis” (p.98). Esto indica, que mediante el análisis el investigador destaca los elementos, componentes reveladores que posteriormente son interpretados; es decir, se hizo hablar el dato, explicando de manera concreta el comportamiento de las variables y sus descriptores. En esta parte el investigador destaca los puntos coincidentes y contradictorias con las teorías; explicando las razones, el porqué de determinados comportamiento, percepciones y relaciones.

En este capítulo se explica detalladamente la metodología llevada a cabo en el trabajo de investigación desarrollado, cumpliendo con los objetivos específicos, que conducen al objetivo general.

www.bdigital.ula.ve

3.4 Datos proporcionados por FUNVISIS y estimación de parámetros resistentes.

Con datos proporcionados por la fundación venezolana de investigaciones sismológicas, FUNVISIS, se inicia la estimación de parámetros resistentes necesarios para el estudio de estabilidad de talud del borde de la terraza de Mérida. Los datos del suelo aportados por FUNVISIS son: espesor de cada capa del suelo, su ubicación en coordenadas con su respectivo lugar de referencia en la ciudad de Mérida, velocidades de onda, y densidad. Asimismo los datos proporcionados por FUNVISIS se pueden observar en el anexo 1. En principio se da a conocer dichos datos de la siguiente manera:

3.4.1 Espesores de las capas, en todas las líneas ReMi en estudio.

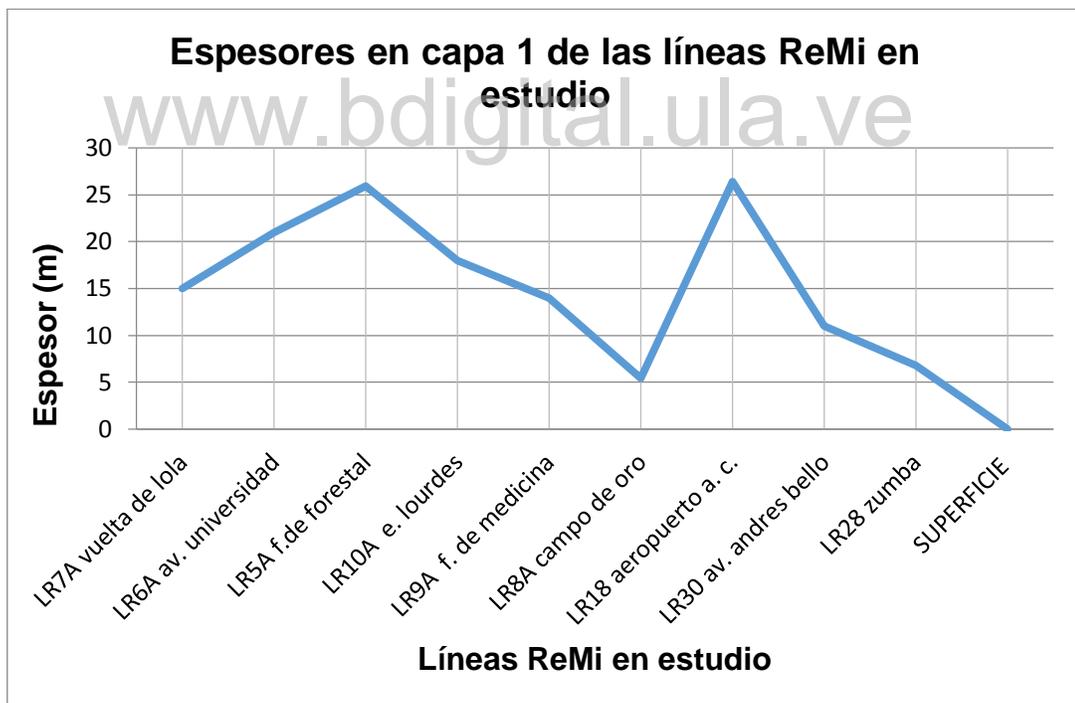


Figura 10. Espesor de los estratos según su ubicación (capa 1). Fuente: FUNVISIS

En la Figura 10 se observa la variación del espesor de la primera capa de suelo determinada a lo largo de todo el borde de la meseta, expresando los valores mínimos de dicha capa a la altura de los sectores “Campo de Oro” y “Zumba”, quedando en evidencia que el resto de la terraza mantiene un espesor aproximado de 20 metros en su primera capa. El espesor de las capas es un indicador del grado de competencia que tiene ésta ante un evento detonante, y más aún en el caso de esta capa superficial, ya que es la que tiene menos densificación, como se muestra en la Tabla 7, por lo tanto, mientras más espesor tenga, menor será su competencia y amplificará más las cargas dinámicas de un sismo. El rango de espesor en esta primera capa es de 5,44 a 26,4 metros.

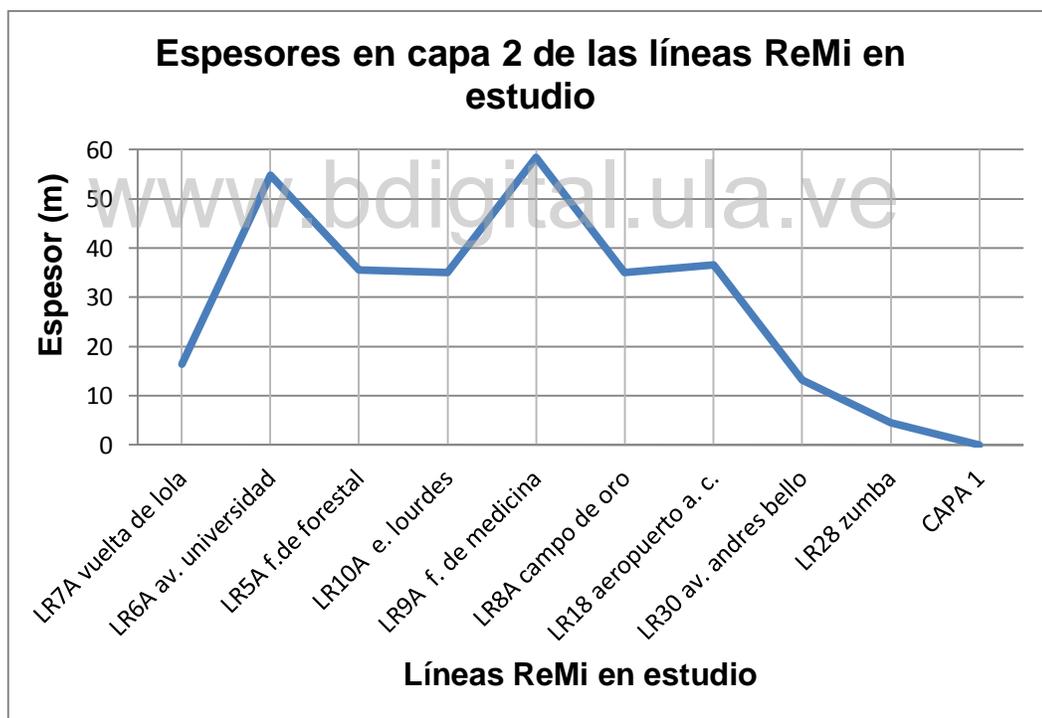


Figura 11. Espesor de los estratos según su ubicación (capa 2). Fuente: FUNVISIS

En la Figura 11 se observa la variación del espesor de la segunda capa de suelo determinada a lo largo de todo el borde de la meseta, expresando

los valores mínimos de dicha capa a la altura de los sectores “Vuelta de Lola”, “Avenida Andrés Bello” y “Zumba”, quedando en evidencia que el resto de la terraza mantiene un espesor aproximado de 30 metros en su segunda capa de suelo; sin embargo, en los sectores “Avenida Universidad” y “Facultad de Medicina” duplican su espesor en dicha capa con respecto al promedio. Se debe tomar en cuenta los mayores espesores y estudiar sus pesos unitarios, ya que en esta segunda capa todavía no existe un alto grado de densificación en parte de la terraza. El rango de espesor de la segunda capa es de 4,47 a 58,5 metros.

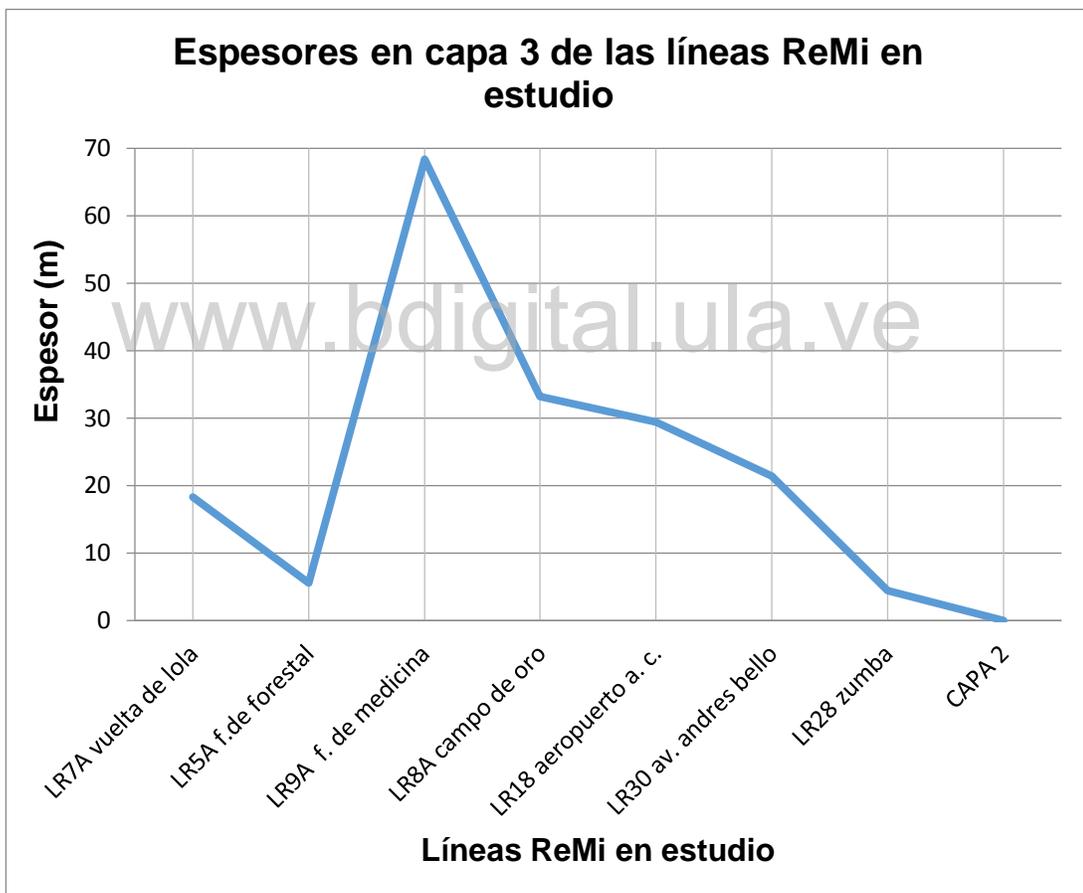


Figura 12. Espesor de los estratos según su ubicación (capa 3). Fuente: FUNVISIS

En la Figura 12 se observa la variación del espesor de la tercera capa de suelo determinada a lo largo de todo el borde de la meseta, expresando los valores mínimos de dicha capa a la altura de los sectores “Facultad de Forestal” y “Zumba”, quedando en evidencia que el resto de la terraza mantiene un espesor aproximado de 20 metros en su tercera capa de suelo; sin embargo, en el sector “Facultad de Medicina” triplica su espesor en dicha capa con respecto al promedio. Ya, a esta profundidad, comienza a evidenciarse cambios en la densificación del suelo significativos al observar las Tabla 7, que indican alta competencia del suelo. El rango de espesor de la tercera capa es de 4,5 a 68,4 metros.

www.bdigital.ula.ve

3.4.2 Velocidades de compresión y de corte proporcionadas por FUNVISIS

Las velocidades de onda P y S aportadas por FUNVISIS se observan en la Tabla 6. La capa 1 presenta velocidades de onda de compresión “P” menores a 1000 m/s a excepción del sector LR18 (aeropuerto Alberto Carnevalli) que tiene una velocidad de 1194,49 m/s, y en los sectores LR8A (Campo de oro) y LR30 (avenida Andrés Bello) no se determinó la velocidad de onda P.

La segunda capa tiene valores mayores a 900 m/s, lo que indica que ya hay una diferencia significativa en su densificación con respecto a la primera capa, a excepción del sector LR5 (Facultad de Forestal), que aún la velocidad de onda P sigue siendo menor a 900 m/s. En las capas 3 y 4 los valores de velocidad de onda P superan los 1000 m/s y en algunos casos los 2000 m/s, lo que significa alta densificación, en las últimas capas. La velocidad de onda P suele ser 1,70 veces mayor a la velocidad de onda S. En la primer capa la velocidad de onda de corte “S” varía de 253 a 707 m/s, en la segunda capa varía de 388 a 1259 m/s, y ya en la tercera y cuarta capa se tiene valores de onda S entre 600 y 1300 m/s.

Tabla 6. Velocidades de onda, Vp y Vs

Modelo	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6
	Velocidad de onda P (m/s)					
LR5A	438,74	673,51	1040,91	1759,31		
LR6A	737,22	1909,70	2642,49			
LR7A	725,49	959,99	1411,39	2249,72		
LR8A	no se determinó					
LR9A	726,338	1037,403	1143,048	3050,52		
LR10A	1008	2181,89	2410,78			
LR18	1194,49	1915,56	2067,98	3246,32		
LR28	514,92	1501,06	1348,47	1548,02	1759,31	

LR30	no se determinó					
	Velocidad de onda S (m/s)					
LR5A	253,32	388,86	600,98	1015,76		
LR6A	426,14	1103,87	1527,45			
LR7A	419,36	554,91	815,83	1300,41		
LR8A	707,4	731,12	995,43	1100,48		
LR9A	419,36	598,96	659,96	1761,27		
LR10A	582,02	1259,75	1391,91			
LR18	690,456	1107,26	1195,36	1876,487		
LR28	297,29	866,66	778,56	893,77	1015,76	
LR30	331,25	598,96	795,5	846,33	995,43	1141,14

Fuente: FUNVISIS

La Tabla 6 muestra las velocidades de compresión P y velocidades de corte S, para cada capa, en cada línea ReMi, a excepción de las líneas LR8A (sector campo de oro) y LR30A (avenida Andrés Bello), en los cuales no se determinó las velocidad de onda P.

Al contar con las velocidades de compresión proporcionadas por FUNVISIS en la Tabla 6, se puede usar la Tabla 9 para estimar un ángulo de fricción interna y así obtener los valores de la Tabla 10.

3.4.3 Peso Unitario

El peso unitario se calcula a partir de los valores de densidad proporcionados por FUNVISIS, al calcular el producto de cada valor de densidad con el valor de aceleración de la gravedad (9,81 m/s), y así construir la Tabla 7.

En general, los valores de peso unitario (γ), abarcan un rango de 15 a 24 a kN/m³ para las primeras 3 capas a lo largo de toda la terraza. Así mismo, se puede observar que el peso unitario en la cuarta y última capa, aumenta significativamente con respecto a la capa anterior en toda la

longitud de la terraza. Las zonas con menor peso unitario en promedio en sus 3 capas son “Facultad de Forestal” (LR5A) y “Avenida Andrés Bello” (LR30). Ver Tabla 7.

Tabla 7. Peso unitario de las capas

Modelo	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6
	Peso Unitario γ (kN/m ³)					
LR5A	15,68	16,86	18,62	26,26		
LR6A	16,86	18,62	24,89			
LR7A	16,66	18,42	20,78	25,48		
LR8A	18,23	19,40	21,95	25,09		
LR9A	16,07	18,03	19,40	26,66		
LR10A	19,99	23,13	24,89			
LR18	20,38	20,97	21,36	24,11		
LR28	17,44	19,40	19,99	23,32	24,70	
LR30	16,27	17,25	18,03	19,21	21,56	23,52

Fuente: FUNVISIS

Al conocer los espesores de las capas del suelo, velocidades de onda y peso unitario de cada línea ReMi, se inicia el cálculo de coeficiente de balasto, el cual será un valor necesario para la estimación de los parámetros resistentes, ángulo de fricción y cohesión.

3.4.4 Coeficiente de Balasto

Se calcula el coeficiente de reacción o balasto para cada capa, para cada línea ReMi en estudio, a partir de la ecuación 1.

Ésta Tabla 8 muestra como varía el coeficiente de balasto en cada línea ReMi en estudio, para cada capa. La capa 1 varía el coeficiente de balasto de 15 a 56 N/cm³, obteniendo el menor valor en la línea LR5A (Facultad de Forestal), la segunda capa varía entre 26 y 116 N/cm³, la tercera capa tiene un rango que va desde 44 hasta 152 N/cm³, y entre la cuarta y pocos valores de la quinta y sexta capa se tienen valores de coeficiente de balasto que van desde 65 hasta 187 N/cm³.

Tabla 8. Coeficiente de Balasto (K)

Línea ReMi en estudio	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6
	Coeficiente de reacción o balasto (N/cm³)					
LR5A	15,89	26,22	44,76	106,71		
LR6A	28,73	82,22	152,09			
LR7A	27,95	40,89	67,80	132,54		
LR8A	51,58	56,75	87,41	110,44		
LR9A	26,96	43,20	51,22	187,79		
LR10A	46,54	116,54	138,59			
LR18	56,30	92,89	102,15	180,95		
LR28	20,74	67,27	62,26	83,39	100,34	
LR30	21,56	41,32	57,38	65,03	85,85	107,36

Al conocer los espesores de las capas del suelo, velocidades de onda, peso unitario, módulo de balasto de cada línea ReMi, se inicia la estimación de los parámetros resistentes, ángulo de fricción y cohesión, necesarios para el estudio de estabilidad de talud en el borde de la terraza de Mérida. Es así, que se comienza con la estimación del ángulo de fricción, que se apoya en la

relación de velocidades de onda con los parámetros resistentes, como la densidad y ángulo de fricción, dicha relación se basa en el trabajo de investigación de López, Mejía y Vega (2008) y el proyecto de Úcar (2010, pág. 28), en los cuales existen diferentes relaciones y clasificaciones de suelos en función de las velocidades de onda P y S obtenidas en el material en estudio, describiendo niveles de densificación, rigidez y así obtener datos cualitativos y cuantitativos que relacionan la velocidad P y S con el ángulo de fricción, para finalmente realizar la construcción de la Tabla 9.

Tabla 9. Relación entre ángulo de fricción y Velocidad de compresión

V_p (m/s)	Ángulo de fricción ϕ
≤ 900	30°- 32°
$900 < V_p \leq 2000$	35°- 37°
> 2000	40°- 42°

La Tabla 9 expresa rangos estimados de ángulo de fricción interna relacionados con la velocidad de compresión P, para valores de velocidad de onda P menores a 900 m/s, el coeficiente de fricción se considera bajo, para velocidades de compresión mayores a 900 m/s y menores a 2000 m/s, el coeficiente de fricción se considera con valores intermedios y para velocidades muy altas, mayores a 2000 m/s se considera un alto ángulo de fricción interna.

3.4.5 Ángulo de fricción estimado

La Tabla 10 presenta los ángulos de fricción estimados para cada capa, para cada línea ReMi. La capa 1 resulta con los menores valores de ángulo de fricción interna, obteniendo un rango que va desde 20° a 36°, este rango es esperado, ya que al analizar los valores de pesos unitarios y velocidades de onda P, se evidencia que la primera capa del material es el menos densificado y por lo tanto con valores de ángulos de fricción interna bajos. La capa 2 varía desde 27° a 41° de ángulo de fricción interna, la capa 3 tiene un

rango desde 34° hasta 41°, y la capa 4 varía desde 36° a 41°, resultando esta última capa con los mayores valores de ángulo de fricción interna, ya que es la capa con mayor densificación. En la data proporcionada por FUNVISIS existe la ausencia de dos valores de velocidades de compresión correspondientes a la línea ReMi LR8A y LR30, sin embargo, se realiza la estimación de ángulo de fricción para estas dos líneas ReMi, usando la relación de la velocidad de corte con el ángulo de fricción estudiados en el trabajo de investigación de López, Mejía y Vega (2008), asimismo se aporta un mayor sustento a dicha estimación de valores de ángulo de fricción al comparar y aproximar para estas dos líneas ReMi con los ya estimados en las líneas ReMi más cercanas, es decir, para la línea ReMi LR8A (sector Campo de Oro), se compara y aproxima el valor de ángulo de fricción con el de la línea ReMi LR18 (Aeropuerto Alberto Carnevalli), y el de la línea ReMi LR30 (avenida Andrés Bello), se compara y aproxima el valor de ángulo de fricción con el de la línea ReMi LR28 (sector Zumba).

Tabla 10. Valores de Ángulo de fricción interna (ϕ)

Línea ReMi en estudio	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6
	Ángulo de fricción interna, ϕ (grados)					
LR5A	20	27	34	36		
LR6A	28	36	41			
LR7A	28	33	36	41		
LR8A	36	36	36	41		
LR9A	27	34	36	41		
LR10A	36	41	41			
LR18	36	36	41	41		
LR28	24	36	36	36	36	
LR30	25	34	36	41	41	

Al obtener el valor de ángulo de fricción de cada capa en cada línea ReMi, luego se procede a estimar el parámetro de cohesión, necesario para empezar el estudio de estabilidad del talud del borde de la terraza de Mérida.

Utilizando el ábaco de Solentache en la Figura 13, con la ayuda del valor de coeficiente de balasto determinado en la Tabla 8 y el ángulo de fricción interna mostrado en la Tabla 10, se estima la cohesión para cada capa de suelo y para cada línea ReMi, como se muestra en la Tabla 11.

www.bdigital.ula.ve

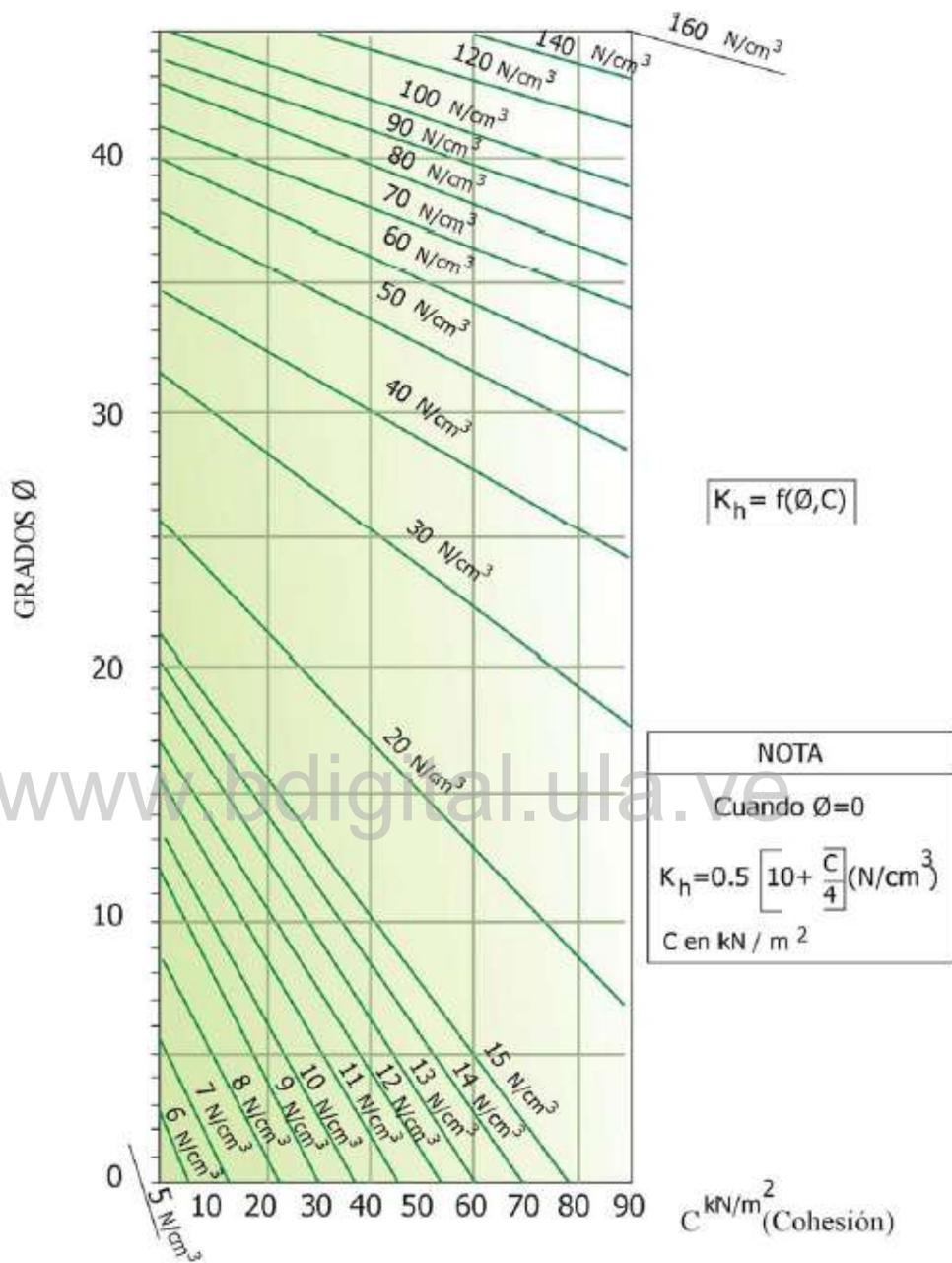


Figura 13. Valores del coeficiente de reacción o balasto en función de los parámetros de corte, según Pfister, P., Evers, G., Guillaud, M. y Davidson, R., (1982), *Permanent ground anchors –Soletanche Design Criteria*, (Vols. Report#FHWA/RD-81/150). Department of Transportation, Washington DC, 195p.

3.4.6 Cohesión Calculada.

En la Tabla 11 se muestra el valor de la cohesión estimada para cada capa de suelo en cada línea ReMi, el cual es uno de los parámetros resistente necesario para iniciar el análisis de estabilidad de los taludes. Además, la Tabla 11 en general expresa valores de cohesión que aumentan directamente con la profundidad de cada capa, a excepción de la línea ReMi LR5 (sector Facultad de Forestal) y la línea ReMi LR9 (sector Facultad de Medicina), en los cuales los valores de cohesión son bajos y no varían significativamente en las primeras 3 capas. El rango de valores de cohesión en la primera capa de suelo es de 7 a 29 kN/m², en la segunda capa de suelo el rango de valores de cohesión es de 10 a 98 kN/m², en la tercera capa de suelo el rango de valores de cohesión es de 19 a 99 kN/m², y en la cuarta capa de suelo el rango de valores de cohesión es de 29 a 99 kN/m².

Tabla 11. Valores de cohesión (C)

Línea ReMi en estudio	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6
	Cohesión C (kN/m²)					
LR5A	12	12	19	99		
LR6A	16	88	99			
LR7A	16	20	60	98		
LR8A	19	29	94	77		
LR9A	14	19	19	99		
LR10A	7	87	98			
LR18	29	98	63	99		
LR28	9	54	43	88	99	
LR30	10	10	30	29	90	

Al obtener los valores de los parámetros resistentes, peso unitario, ángulo de fricción y cohesión, para cada capa y cada línea ReMi, se inicia el estudio de estabilidad del talud del borde de la terraza de Mérida, que permite: obtener diferentes curvas de rotura del talud, establecer distancia superficial de retiro del límite de la terraza y finalmente construir mapas de retiro, vulnerabilidad, amenaza y riesgo geotécnico.

3.5 Estudio de estabilidad del talud del borde de la terraza de Mérida

Para iniciar el estudio de estabilidad de talud del borde de la terraza de Mérida, se debe ubicar los 9 perfiles de talud, distribuidos a lo largo de la terraza, como se muestra en la Figura 14.

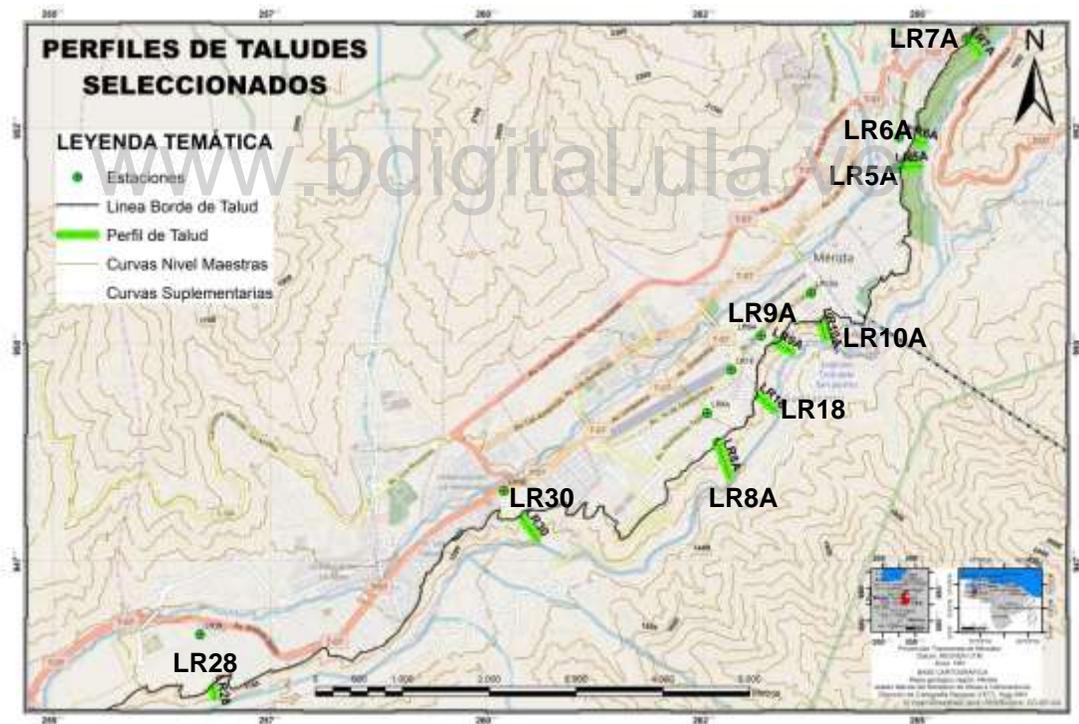


Figura 14. Ubicación de perfiles de taludes en estudio

Al conocer la ubicación de los 9 perfiles de talud, se comienza el estudio de estabilidad de talud, modelando cada perfil por diferentes métodos como: equilibrio límite, en estado seco, saturado y con carga sísmica ($K_h=0,3$),

asimismo se estudia los 9 perfiles en estudio por el método de teoría del colapso, utilizada en rotura espiral logarítmica, rotura plana y rotura circular, igualmente se estudian por el método de cálculo variacional utilizada rotura circular y rotura plana.

3.5.1 Determinación del factor de seguridad y retiro a través del método de equilibrio límite, estado seco

Se procede a la obtención del factor de seguridad y distancia de retiro en su estado seco, a través del método de equilibrio límite, específicamente de los métodos por dovela de, ordinario o fellenius, bishop simplificado, Janbú y Morgenstern–Price.

Para obtener la mencionada información se modela en el programa Slide los 9 perfiles de talud (ver Figura 14) en estado seco de la siguiente manera: se inicia configurando el modelo (opción analysis), se coloca el nombre del proyecto, unidades a usar, sentido del talud, y métodos a aplicar (ordinario o fellenius, bishop simplificado, Janbú y Morgenstern–Price), seguidamente se configura la geometría del talud, en coordenadas “x” y “y”, incluyendo la división de los estratos según su espesor, con la opción “boudaries”, posteriormente se asigna a cada capa de suelo todos los parámetros resistentes, peso unitario, ángulo de fricción, cohesión, usando la opción “properties”, en ese mismo orden se procede a la opción “surfaces” se decide el tipo de rotura, que en este caso, se analizó con rotura circular, asimismo, en la opción “boundaries” se puede indicar el nivel freatico del agua en el talud, que para este caso es nulo, ya que se analiza el talud en estado seco, además en la opción “loading” es posible aplicar una cargar externa en el talud, sin embargo, para la presente investigación se analiza los taludes en ausencia de dicha carga.

Al culminar con el suministro de datos necesarios mencionados, se procede a analizar el modelo, usando la opción “compute” e “interpret”. De esta manera se obtiene el resultado procesado por el programa, ilustrando

así la línea de rotura mas probable con su respectivo factor de seguridad para cada método ya mencionado.

Es importante señalar que se modela cada corte del talud a una profundidad máxima de 50 metros o solo las primeras 2 capas, debido a que a profundidades mayores a 50 metros el suelo está altamente densificado como lo demuestran los parámetros resistentes ya determinados, por lo tanto la rotura mas probable se encuentra en las primeras 2 o 3 capas del talud en estudio. Observar Anexos 2.

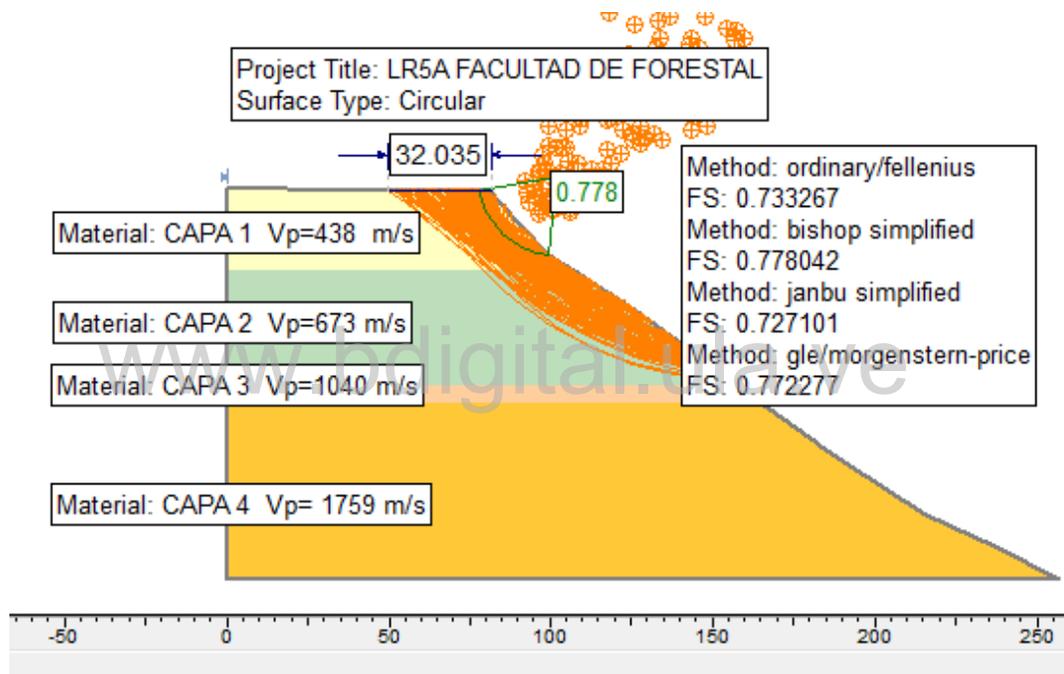


Figura 15. Modelo del talud LR5A (Facultad de Forestal) a través del método de equilibrio límite

En la Figura 15 se muestra el modelo del talud LR5A (Facultad de Forestal), modelado en el programa Slide en estado seco, y tipo de rotura circular, el cual expresa el factor de seguridad, por los metodos Fellenius, Bishop, Janbu y Morgenstern resultando menores a 1, indicando que para el tipo de rotura circular mas probable el talud colapsa, ya que las fuerzas desestabilizadoras son mayores a las que lo mantienen estable. Además se

ilustra una rotura circular condicionada para un factor de seguridad igual a 1 (es el factor de seguridad mínimo aceptable), la cual exige un retiro de 32 metros desde el borde de la terraza.

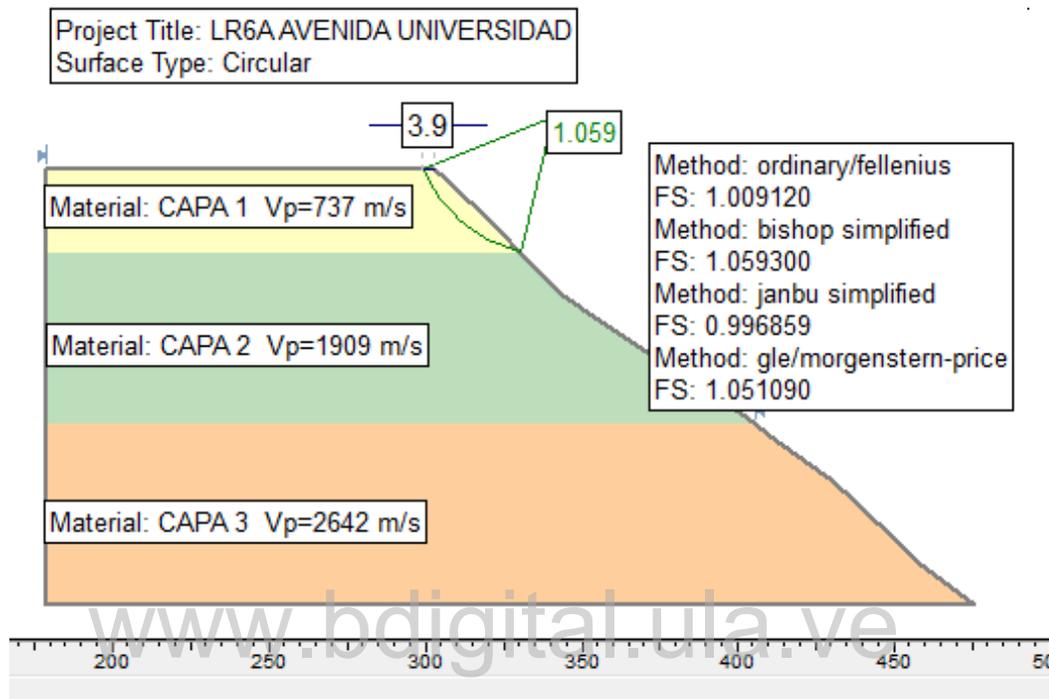


Figura 16. Modelo del talud LR6A (Avenida universidad) a través del método de equilibrio límite

En la Figura 16 se muestra el modelo del talud LR6A (avenida Universidad), modelado en el programa Slide en estado seco, y tipo de rotura circular, el cual expresa el factor de seguridad, por los métodos Fellenius, Bishop, Janbu y Morgenstern, los cuales son mayores a 1, por lo que el presente talud está en equilibrio para estas condiciones.

Se observa una distancia de 3,9 metros, para la rotura circular mas probable, sin embargo no se considera como distancia de retiro ya que el factor de seguridad no es menor a 1, por lo tanto se considera estable el modelo LR6A (avenida Universidad) para estas condiciones.

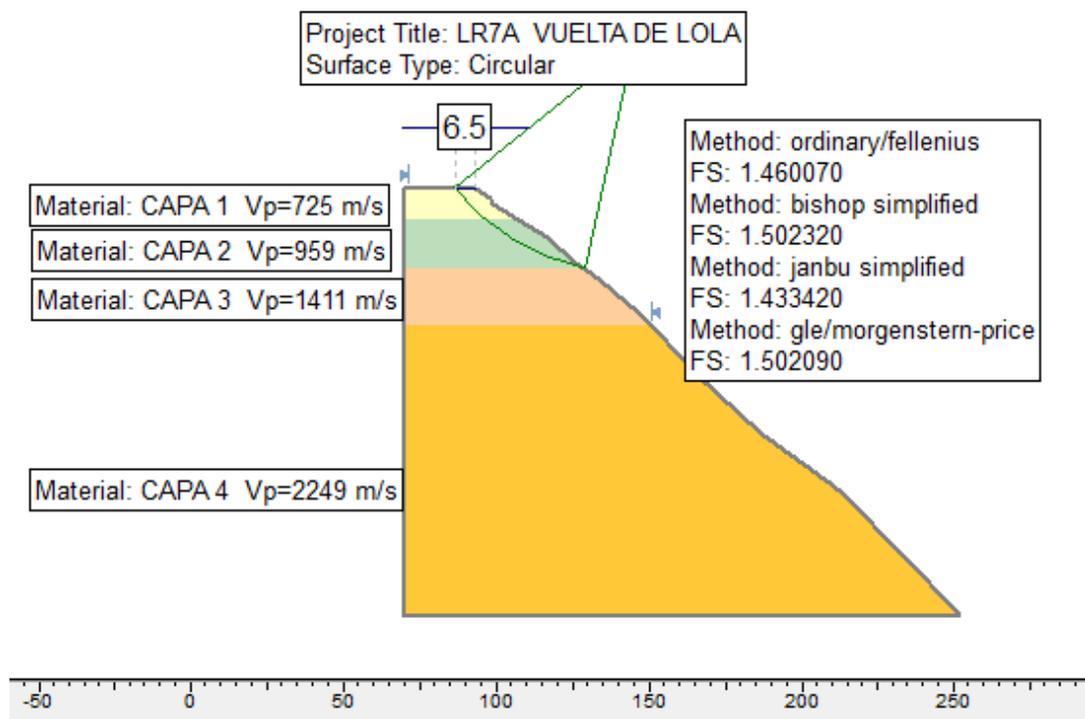


Figura 17. Modelo del talud LR7A (Vuelta de lola) a través del método de equilibrio límite

En la Figura 17 se muestra el modelo del talud LR7A (vuelta de lola), modelado en el programa Slide en estado seco, y tipo de rotura circular, el cual expresa el factor de seguridad, por los metodos Fellenius, Bishop, Janbu y Morgenstern, los cuales son mayores a 1, por lo que el presente talud está en equilibrio para estas condiciones.

Se observa una distancia de 6,5 metros, para la rotura circular mas probable, sin embargo no se considera como distancia de retiro ya que el factor de seguridad es mayor a 1,4 en los 4 métodos, por lo tanto se considera estable el modelo LR7A (sector Vuelta de Lola) para estas condiciones.

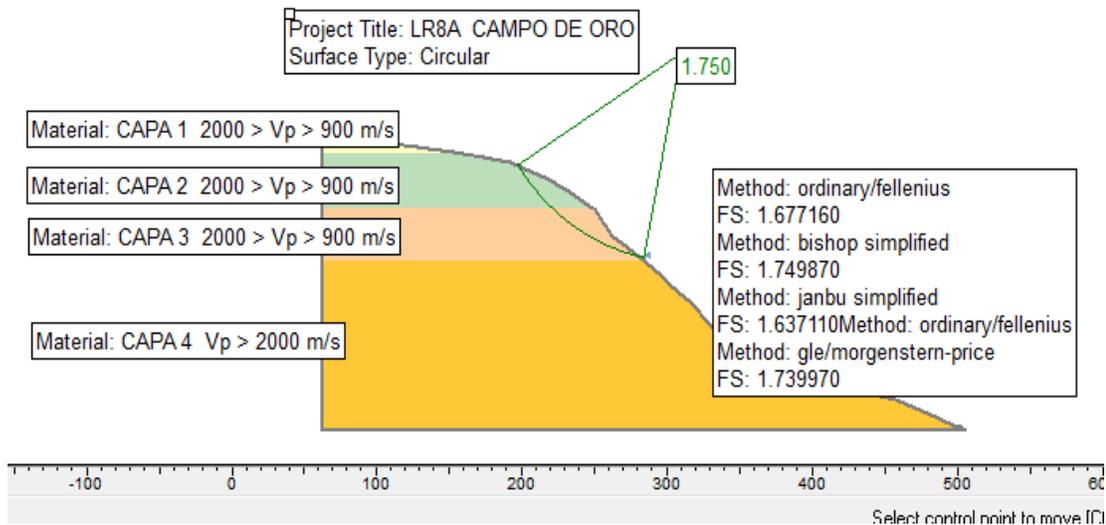


Figura 18. Modelo del talud LR8A (Campo de oro) a través del método de equilibrio límite

En la Figura 18 se muestra el modelo del talud LR8A (Campo de Oro), modelado en el programa Slide en estado seco, y tipo de rotura circular, el cual expresa el factor de seguridad, por los métodos Fellenius, Bishop, Janbu y Morgenstern, los cuales son mayores a 1, por lo que el presente talud está en equilibrio para estas condiciones.

Se observa un talud con poca pendiente en la corona con un factor de seguridad promedio entre los 4 métodos modelados mayor a 1,6, por lo tanto se considera estable el modelo LR8A (Campo de Oro) para estas condiciones.

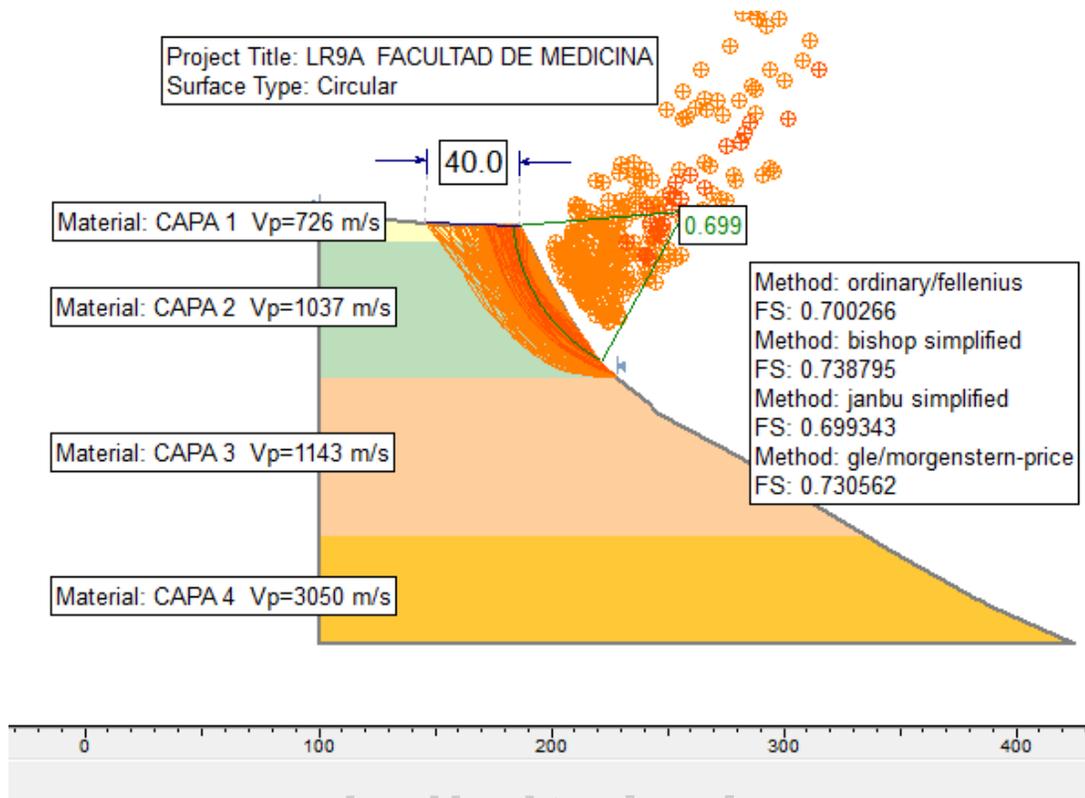


Figura 19. Modelo del talud LR9A (Facultad de Medicina) a través del método de equilibrio límite

En la Figura 19 se muestra el modelo del talud LR9A (Facultad de Medicina), modelado en el programa Slide en estado seco, y tipo de rotura circular, el cual expresa el factor de seguridad por los metodos, Fellenius, Bishop, Janbu y Morgenstern, resultando menores a 1, indicando que para el tipo de rotura circular mas probable el talud colapsa, ya que las fuerzas desestabilizadoras son mayores a las que lo mantienen estable.

Además se ilustra una rotura circular condicionada para un factor de seguridad igual a 1 (es el factor de seguridad mínimo aceptable), la cual exige un retiro de 40 metros desde el borde de la terraza.

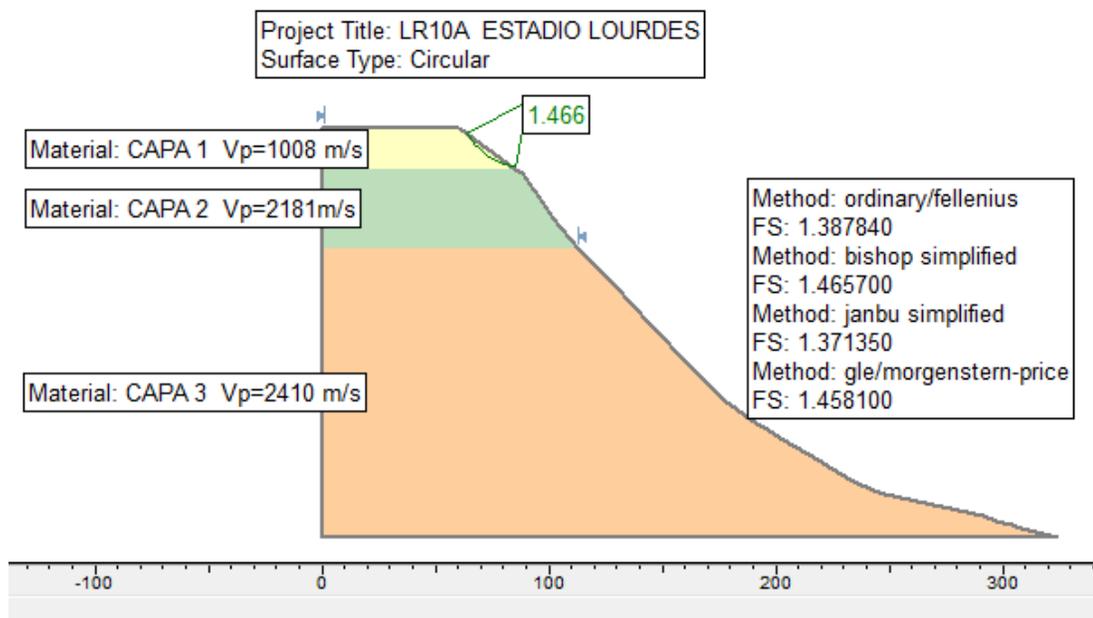


Figura 20. Modelo del talud LR10A (Estadio Lourdes) a través del método de equilibrio límite

www.bdigital.ula.ve

En la Figura 20 se muestra el modelo del talud LR10A (estadio Lourdes), modelado en el programa Slide en estado seco, y tipo de rotura circular, el cual expresa el factor de seguridad, por los métodos Fellenius, Bishop, Janbu y Morgenstern, los cuales son mayores a 1, por lo que el presente talud está en equilibrio para estas condiciones.

Se observa que la rotura circular mas probable no alcanza la cresta, y además el factor de seguridad es mayor a 1,3 en los 4 métodos, por lo tanto se considera estable el modelo LR10A (estadio Lourdes) para estas condiciones.

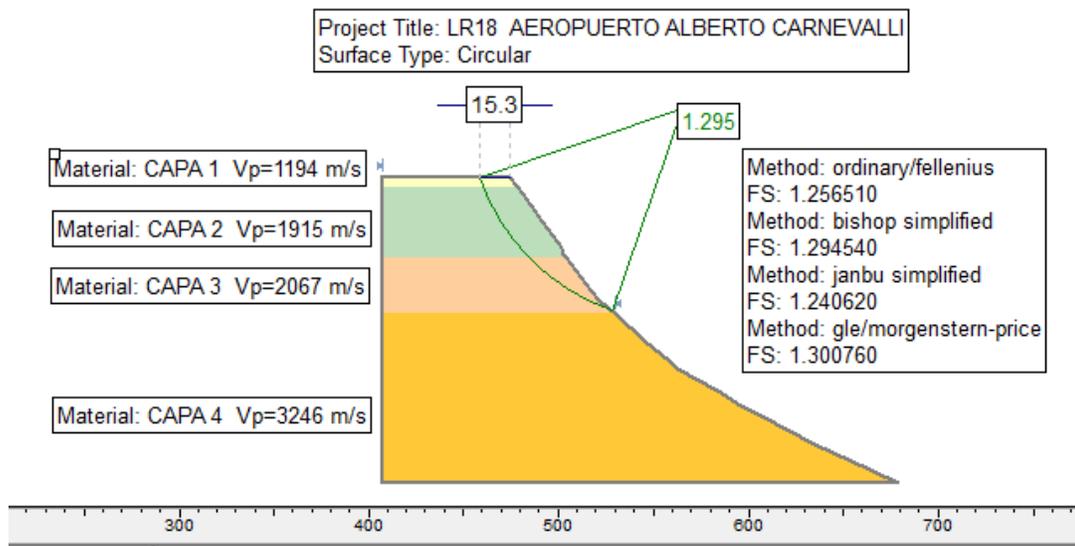


Figura 21. Modelo del talud LR18 (Aeropuerto Alberto Carnevali) a través del método de equilibrio límite

En la Figura 21 se muestra el modelo del talud LR18 (aeropuerto Alberto Carnevali), modelado en el programa Slide en estado seco, y tipo de rotura circular, el cual expresa el factor de seguridad, por los métodos Fellenius, Bishop, Janbu y Morgenstern, los cuales son mayores a 1, por lo que el presente talud está en equilibrio para estas condiciones.

Se observa una distancia de 15,3 metros, para la rotura circular mas probable, sin embargo no se considera como distancia de retiro ya que el factor de seguridad es mayor a 1,2 en los 4 métodos, por lo tanto se considera estable el modelo LR18 (aeropuerto Alberto Carnevali) para estas condiciones.

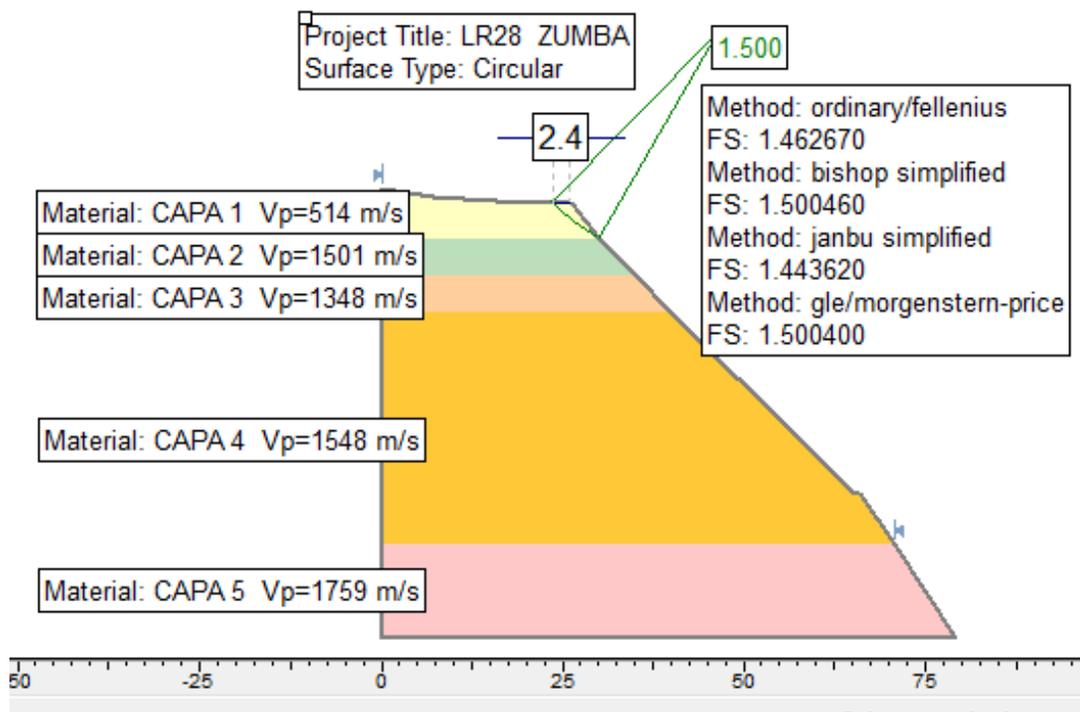


Figura 22. Modelo del talud LR28. (Zumba) a través del método de equilibrio límite

En la Figura 22 se muestra el modelo del talud LR28 (sector Zumba), modelado en el programa Slide en estado seco, y tipo de rotura circular, el cual expresa el factor de seguridad, por los metodos Fellenius, Bishop, Janbu y Morgenstern, los cuales son mayores a 1, por lo que el presente talud está en equilibrio para estas condiciones.

Se observa una distancia de 2,4 metros, para la rotura circular mas probable, sin embargo no se considera como distancia de retiro ya que el factor de seguridad es mayor a 1,4 en los 4 métodos, por lo tanto se considera estable el modelo LR28 (sector Zumba) para estas condiciones.

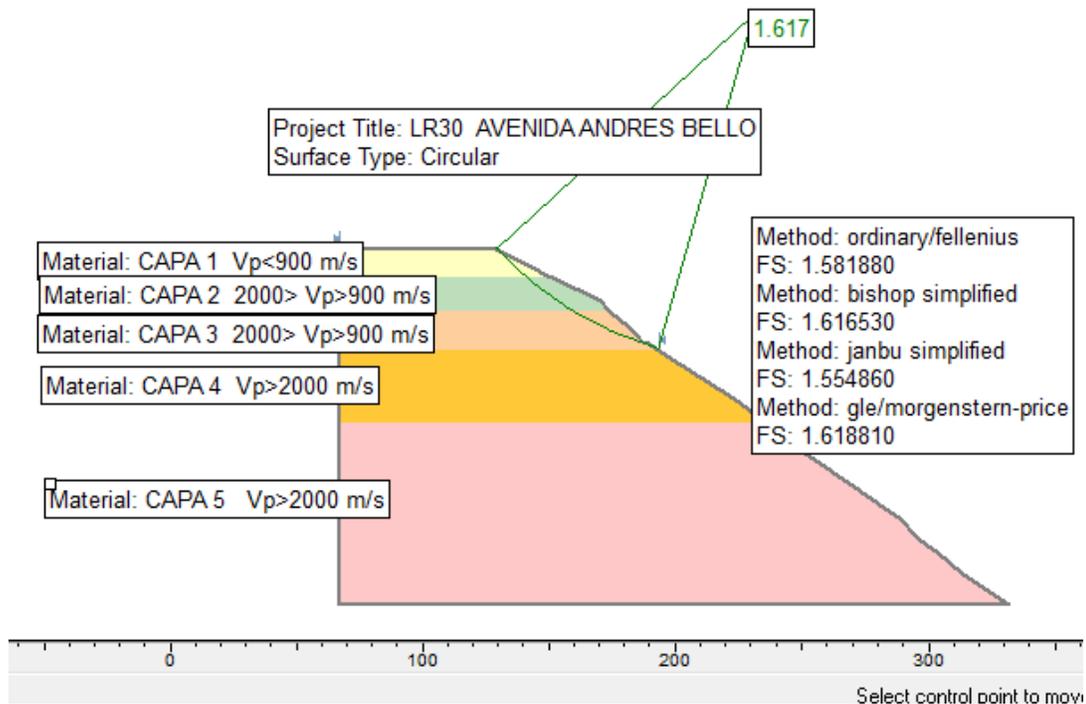


Figura 23. Modelo del talud LR30 (Avenida Andrés Bello) a través del método de equilibrio límite

En la Figura 23 se muestra el modelo del talud LR30 (avenida Andrés Bello), modelado en el programa Slide en estado seco, y tipo de rotura circular, el cual expresa el factor de seguridad, por los métodos Fellenius, Bishop, Janbu y Morgenstern, los cuales son mayores a 1, por lo que el presente talud está en equilibrio para estas condiciones.

Se observa que la rotura circular mas probable no alcanza la cresta, y además el factor de seguridad es mayor a 1,5 en los 4 métodos, por lo tanto se considera estable el modelo LR30 (avenida Andrés Bello) para estas condiciones.

Tabla 12. Factores de seguridad, estado seco

Modelo	Factor de Seguridad (seco)				Retiro en (m)
	Ordinario	Bishop	Janbú	Morgenstern	
LR5A	0,732	0,774	0,722	0,765	32
LR6A	1,026	1,059	1,018	1,051	0
LR7A	1,402	1,449	1,381	1,448	0
LR8A	1,463	1,538	1,461	1,548	0
LR9A	0,694	0,739	0,693	0,731	40
LR10A	1,276	1,350	1,259	1,341	0
LR18	1,257	1,295	1,241	1,301	0
LR28	1,416	1,465	1,394	1,474	0
LR30	1,590	1,635	1,566	1,638	0

La Tabla 12 muestra los valores del factor de seguridad por los diferentes métodos utilizados, así como, la distancia de retiro a lo largo del borde de la terraza de Mérida. La distancia de retiro como se explica en el capítulo 2, es la distancia en metros desde el borde de la terraza hasta el corte de la rotura con la cresta de talud (siempre y cuando el factor de seguridad sea igual o menor a 1), es decir, la distancia mínima en metros desde el borde de la terraza en dirección al interior de la meseta, que no debe ser ocupada ya que tiene determinada vulnerabilidad y amenaza, y por lo tanto cierto riesgo. La distancia de retiro en estado seco solo se presenta en dos modelos del talud, con un retiro máximo de 40 m en los taludes donde el factor de seguridad es menor e igual a 1 (LR5A Facultad de Forestal y LR9A Facultad de Medicina).

La Tabla 12 muestra el factor de seguridad por 4 criterios distintos aplicando el método de equilibrio límite, en estado seco y en ausencia de cargas externas. Se evidencia que todos los modelos realizados a lo largo del borde de la terraza están en equilibrio bajo estas condiciones al tener el

factor de seguridad mayor a 1, a excepción de los modelos LR5 Y LR9, ya que colapsan sin tener cargas dinámicas o de agua.

3.5.2 Determinación del Factor de Seguridad y retiro a través del método de equilibrio límite, Saturado

Se procede a obtener el factor de seguridad y distancia de retiro saturando 100 % el talud, con el propósito de estudiar su condición más desfavorable.

Se procede a modelar en el programa Slide los 9 modelos con el mismo procedimiento explicado en el método de equilibrio límite, estado seco, por rotura circular, solo que esta vez, se incluye el nivel freático con 100% de saturación.

A continuación la Figura 24 es un ejemplo de los 9 modelos analizados por el método de equilibrio límite para la determinación del factor de seguridad y retiro considerando el 100%, saturado. Ver anexos 2.

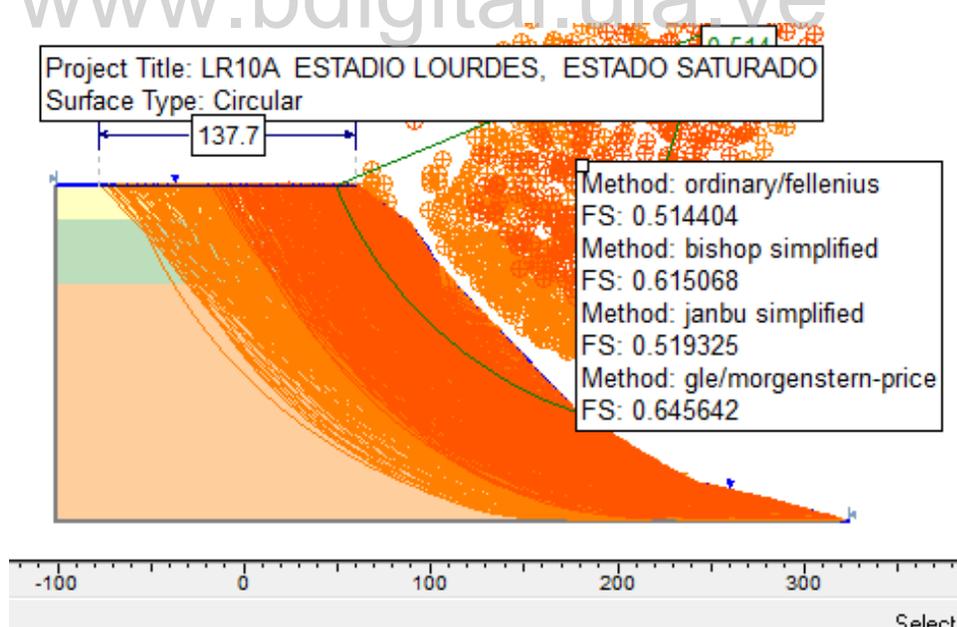


Figura 24. Modelo LR10A (estadio Lourdes) por método de equilibrio límite en estado saturado, análisis a todo el talud

En la Figura 24 se muestra el modelo LR10A (estadio Lourdes) por el método de equilibrio límite en estado saturado, por rotura circular, que cubre toda su altura, y así muestra las distancias de retiro más grandes que arroja el programa por este método. El factor de seguridad resultó inferior a 1 en los 4 métodos de equilibrio límite, indicando que para el tipo de rotura circular mas probable el talud colapsa, ya que las fuerzas desestabilizadoras (sobre todo la ejercida por el agua) son mayores a las que lo mantienen estable.

Además se ilustra una rotura circular condicionada para un factor de seguridad igual a 1 (es el factor de seguridad mínimo aceptable), la cual exige un retiro de 138 metros desde el borde de la terraza.

La Tabla 13 muestra el factor de seguridad obtenido para los diferentes modelos del talud estudiados, en estado de saturación.

Tabla 13. Factor de seguridad y Retiros, estado saturación 100%

Modelo	Factor de Seguridad (Saturado)				Retiro en (m)
	Ordinario	Bishop	Janbú	Morgenstern	
LR5A	0,231	0,279	0,235	0,298	81
LR6A	0,325	0,415	0,347	0,432	116
LR7A	0,624	0,723	0,649	0,741	93
LR8A	0,685	0,780	0,704	0,798	81
LR9A	0,072	0,043	0,010	0,301	263
LR10A	0,516	0,627	0,512	0,657	138
LR18	0,264	0,366	0,258	0,400	130
LR28	0,713	0,832	0,734	0,833	53
LR30	0,596	0,670	0,609	0,708	100

La Tabla 13 destaca que para los diferentes criterios analizados se obtienen un factor de seguridad menor a 1, en todos los modelos del talud estudiados, catalogándose como inestables. El rango del retiro se encuentra

entre 44 a 263 m. Es importante observar el factor de seguridad en el modelo LR9A (Facultad de Medicina) resulta con una magnitud muy por debajo del resto de los modelos, esto se debe a que además de tener parámetros resistentes bajos al igual que el modelo LR5A (Facultad de Forestal), tiene una pendiente muy alta que determina que el factor de seguridad sea muy inferior al resto de modelos.

3.5.3 Determinación del factor de seguridad a través del método de equilibrio límite, con carga sísmica

Se procede a obtener el factor de seguridad y distancia de retiro con carga sísmica, con el propósito de estudiar otra condición probable.

Se procede a modelar en el programa Slide los 9 modelos con el mismo procedimiento explicado en el método de equilibrio límite, estado seco, y saturado, por rotura circular, solo que esta vez, se incluirá el coeficiente sísmico horizontal $K_h=0,3$ debido a lo exigido por la norma COVENIN 1756-1:2001 (Edificaciones sismoresistentes) según zona sísmica número 5 para el sector investigado, sin presencia de carga externas o de nivel freático. Se inicia modelando los 9 perfiles del talud, con toda su altura natural.

La Figura 25 es un ejemplo de los 9 modelos analizados por el método de equilibrio límite para la determinación del factor de seguridad y retiro considerando carga sísmica.

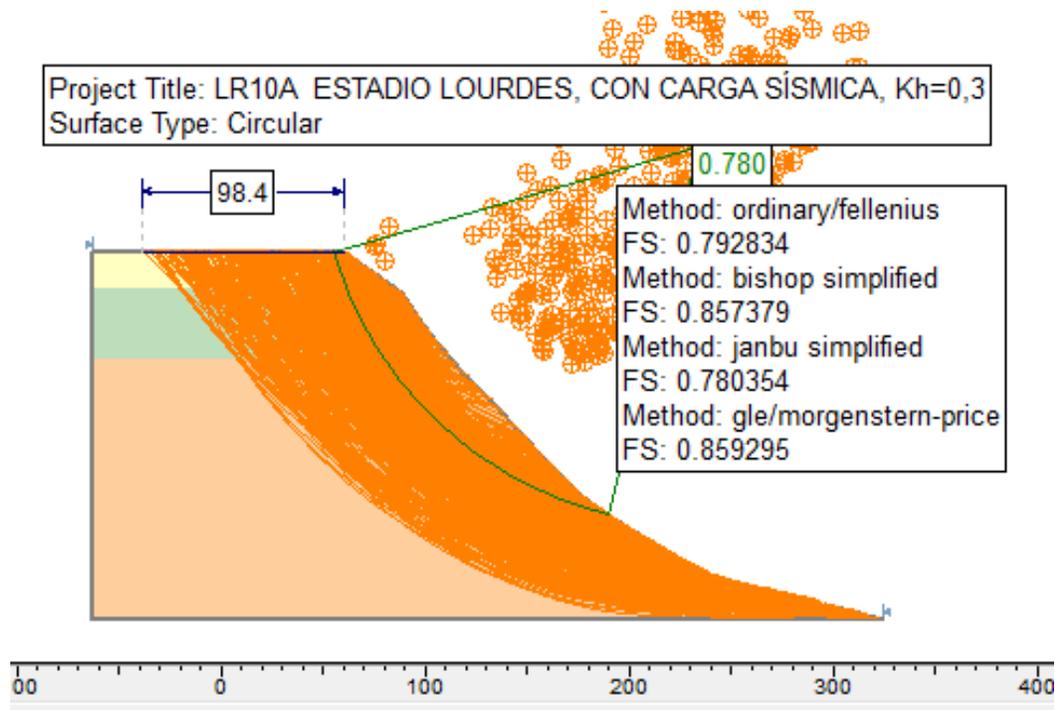


Figura 25. Modelo LR10A (estadio Lourdes) con carga sísmica, $K_h=0,3$, análisis a todo el talud

La Figura 25 se muestra el modelo LR10A (estadio Lourdes) por el método de equilibrio límite con carga sísmica (coeficiente sísmico horizontal, $K_h=0,3$), por rotura circular, que cubre toda su altura, y así muestra las distancias de retiro más grandes que arroja el programa por este método. El factor de seguridad resultó inferior a 1 en los 4 métodos de equilibrio límite, indicando que para el tipo de rotura circular mas probable el talud colapsa, ya que las fuerzas desestabilizadoras (sobretudo la provocada por el sismo) son mayores a las que lo mantienen estable.

Además se ilustra una rotura circular condicionada para un factor de seguridad igual a 1 (es el factor de seguridad mínimo aceptable), la cual exige un retiro de 98 metros desde el borde de la terraza.

La Tabla 14 muestra el factor de seguridad obtenido para los diferentes modelos del talud estudiados, con carga sísmica.

Tabla 14. Factor de seguridad, con carga sísmica (Kh=0,3)

Modelo	Factor de Seguridad (Sismo)				Retiro en (m)
	Ordinario	Bishop	Janbú	Morgenstern	
LR5A	0,474	0,518	0,463	0,517	82
LR6A	0,655	0,693	0,644	0,690	64
LR7A	0,863	0,908	0,848	0,912	22
LR8A	0,911	0,943	0,896	0,954	54
LR9A	0,420	0,478	0,415	0,475	197
LR10A	0,796	0,866	0,786	0,869	98
LR18	0,694	0,731	0,674	0,739	103
LR28	0,907	0,947	0,875	0,944	44
LR30	0,946	0,965	0,928	0,969	22

En la Tabla 14 destaca que para los diferentes criterios analizados se obtienen un factor de seguridad menor a 1, en todos los modelos del talud estudiados, catalogándose como inestables. El rango del retiro se encuentra entre 22 a 197 m. Al observar el factor de seguridad en el modelo LR9A (Facultad de Medicina) resulta con una magnitud muy por debajo del resto de los modelos, esto se debe a que además de tener parámetros resistentes bajos al igual que el modelo LR5A (Facultad de Forestal), tiene una pendiente muy alta que determina que el factor de seguridad sea muy inferior al resto de modelos.

3.5.4 Retiro según profundidad por método de equilibrio límite:

- Estado de saturación.
- Carga sísmica.

Finalmente se determina el retiro del borde de la terraza de Mérida por el método de equilibrio límite primero en estado saturado y posteriormente con carga sísmica, analizando los diferentes taludes en función de las capas,

debido a que es de alta probabilidad que la superficie de rotura se encuentre entre las dos primeras capas, a profundidades menores a 50 metros, como lo evidencia la Tabla 6 la cual muestra velocidades P y S muy altas para las capas con mayor profundidad, indicadores directos del grado de densificación y competencia de este suelo, así como los valores de la Tabla 7 que indican los pesos unitarios altos en las capas más profundas, evidenciando también el alto grado de densificación del suelo a estas profundidades.

El estudio de los modelos del talud en estado seco, arrojó valores de factor de seguridad y retiro con muy poca diferencia al evaluarlos con toda la altura y posteriormente a 50 metros de profundidad. Es por todo lo antes explicado, que se analizan los 9 modelos a diferentes profundidades.

La Figura 26 es un ejemplo de los 9 modelos analizados en estado de saturación en el programa Slide, a diferentes profundidades. En este caso se observa el modelo LR10A (estadio Lourdes).

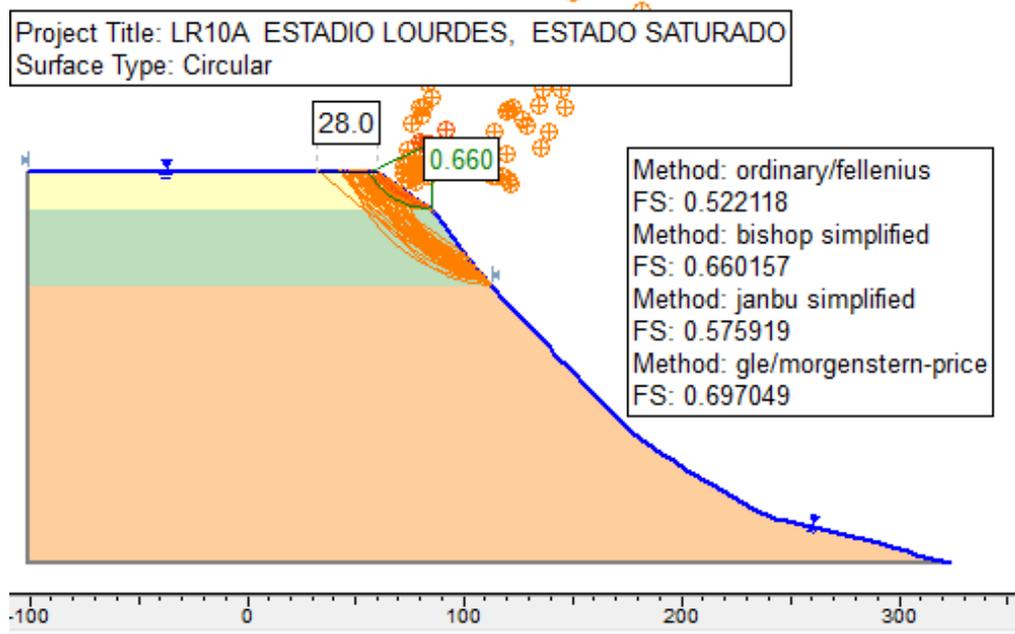


Figura 26. Modelo LR10A (estadio Lourdes) estado de saturación, análisis en las primeras 2 capas

En la Figura 26 se observa un retiro de 28 metros, el cual tiene gran diferencia con el obtenido en la Figura 24, el cual fue de 137 metros, asimismo, cabe destacar que el factor de seguridad no cambió significativamente entre los dos modelos en cuestión.

La Figura 27 es un ejemplo de los 9 modelos analizados con carga sísmica en el programa Slide, a diferentes profundidades. En este caso se observa el modelo LR10A (estadio Lourdes).

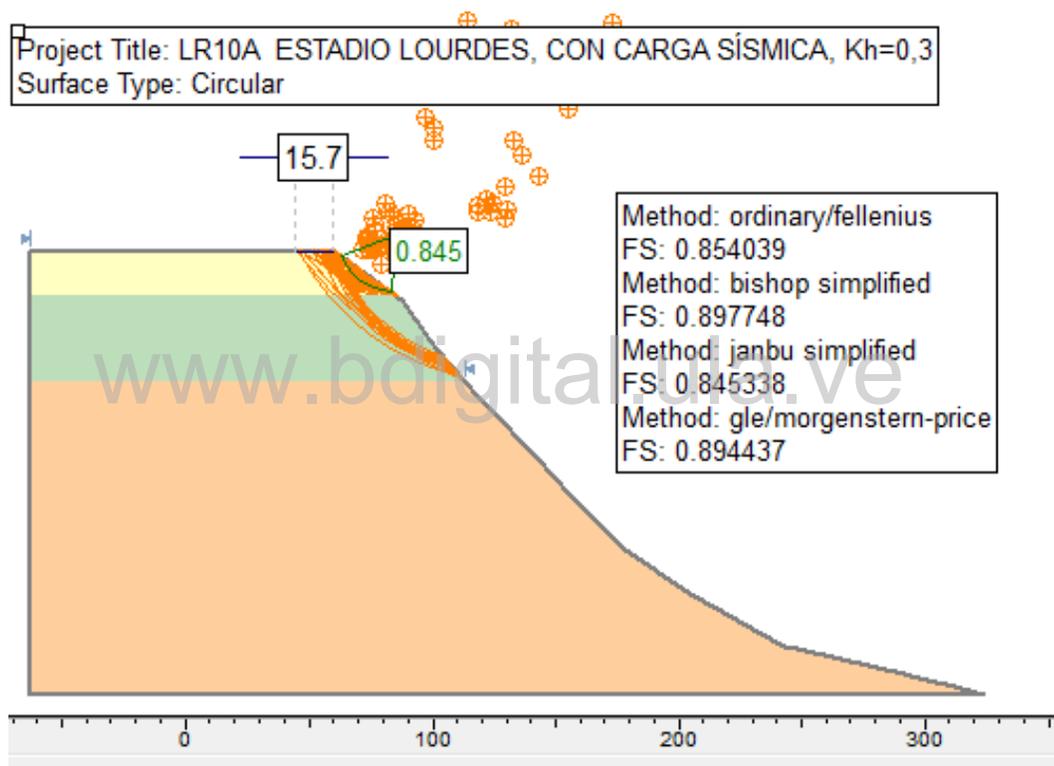


Figura 27. Modelo LR10A (estadio Lourdes) con carga sísmica, Kh=0,3, análisis en las primeras 2 capas

La Figura 27 muestra un retiro de 15,7 metros, el cual tiene una gran diferencia con respecto a el retiro de la Figura 25 que es de 98,4 metros, además el factor de seguridad no cambia significativamente entre los dos modelos comparados.

Después de realizar los 9 modelos a diferentes profundidades, en estado de saturación al 100 % y con carga sísmica ($K_h=0,3$), se obtiene los valores que se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Retiros según profundidad por método de equilibrio límite, estado de saturación y con carga sísmica

Modelo	Primera capa	Segunda capa	Tercera capa	Todas las capas
	Retiro con saturación 100% (m) / Profundidad de la capa (m)			
LR5A	81 / 26	81 / 61	81 / 67	195 / 121
LR6A	52 / 21	76 / 76	116 / 140	116 / 140
LR7A	5 / 15	23 / 32	34 / 50	93 / 145
LR8A	0 / 6	0 / 41	0 / 74	81 / 182
LR9A	4 / 14	166 / 73	185 / 141	263 / 187
LR10A	19 / 18	28 / 53	138 / 180	138 / 180
LR18	1 / 27	27 / 63	96 / 93	130 / 170
LR28	0 / 7	0 / 11	9 / 48	44 / 62
LR30	8 / 11	21 / 24	41 / 70	120 / 140
Retiro con sismo (m) / Profundidad de la capa (m)				
LR5A	81 / 26	81 / 61	81 / 67	81 / 121
LR6A	48 / 21	48 / 76	64 / 140	64 / 140
LR7A	5 / 15	19 / 32	19 / 50	22 / 145
LR8A	0 / 6	0 / 41	0 / 74	54 / 182
LR9A	4 / 14	89 / 73	197 / 141	197 / 187
LR10A	12 / 18	16 / 53	98 / 180	98 / 180
LR18	5 / 27	17 / 63	65 / 93	103 / 170
LR28	0 / 7	0 / 11	13 / 48	44 / 62
LR30	12 / 11	13 / 24	12 / 70	22 / 140

A medida que se considera mayor cantidad de capas (mayor profundidad) para el análisis de la curva de rotura el retiro es mayor, sin embargo, es importante recordar que las últimas capas presentan alta

densificación, mayor grado de consolidación y por ende es probable que la curva de rotura se encuentre en las primeras capas o primeros 50 metros de profundidad. Es por esto, que para efectos de resultados finales en el estudio de estabilidad del talud en sus 9 modelos, se decide, tomar los retiros correspondientes a una profundidad de 50 metros, o la más cercana a esta.

3.6 Aplicación de la Teoría de Colapso en la estabilidad de taludes

Se realizan cálculos promedios entre las diferentes capas de cada modelo del talud (ver Tabla 16) de los siguientes parámetros: cohesión, ángulo de fricción interna, y peso unitario (según ecuaciones 6, 7 y 8), ya que por este método, son necesarios para estudiar cada modelo del talud como una sola masa homogénea y no de distintos estratos como anteriormente estaba modelado y es la aproximación mas cercana a la realidad. Posteriormente se calcula distancias de retiro y coeficiente sísmico horizontal que produce el colapso del talud en estudio.

A continuación se muestra un ejemplo para el modelo LR30:

$$C_{promedio(LR30)} = \frac{RxC_1x\theta_1 + RxC_2x\theta + RxC_3x\theta_3}{Rx\theta_1 + Rx\theta_2 + Rx\theta_3}$$

$$C_{promedio(LR30)} = \frac{137,9x9,7x0,1222 + 137,9x11x0,157 + 137,9x30x0,2793}{137,9x0,1222 + 137,9x0,157 + 137,9x0,2793}$$

$$C_{promedio(LR30)} = 20,22 \text{ kN} / \text{m}^2$$

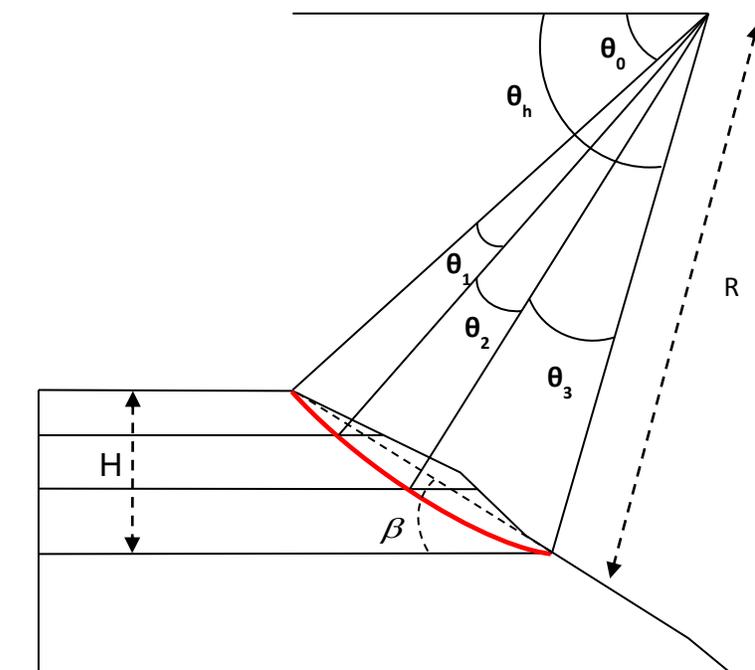


Figura 28. Cálculo de los parámetros resistentes de un talud para usar programa Maple en teoría de colapso.

www.bdigital.ula.ve

Tabla 16. Valores promedios de parámetros de resistentes para los diferentes modelos

Modelo	Cohesión C(kN/m ²)	Ángulo de fricción ϕ (grados)	Peso Unitario γ (kN/m ³)
LR5A	11,86	23,71	16,2
LR6A	16,00	28,00	16,9
LR7A	18,87	31,59	17,9
LR8A	70,24	36,00	21,1
LR9A	18,51	33,32	17,8
LR10A	7,00	36,00	20,0
LR18	59,31	36,23	20,7
LR28	9,00	24,00	17,4
LR30	20,22	33,03	17,4

La Tabla 16 muestra los parámetros resistentes que son utilizados para cada modelo del talud y así analizarlo como una sola masa homogénea en la aplicación de la teoría del colapso.

Se puede comenzar a aplicar la teoría del colapso al contar con los promedios de los parámetros resistentes (ver Tabla 16) y conocer previamente las características de la rotura como se observan en la Figura 28, las cuales son proporcionadas por el análisis de los modelos en el programa Slide, se continúa con el análisis de cada modelo del talud, usando el programa matemático Maple.

3.6.1 Aplicación de la Teoría de Colapso utilizada en rotura espiral logarítmica

El programa matemático Maple permite realizar el cálculo del coeficiente horizontal sísmico “ K_C ” y la distancia de retiro del borde de la terraza “ L ” usando las ecuaciones 9 a la 19.

Primero se debe conocer los siguientes parámetros:

H = Altura de la rotura. (Obtenida en el programa Slide)

p_u = Peso unitario.

p = Carga externa sobre el talud (para la presente investigación es nula).

x = Factor de sobrecarga.

C = Cohesión (promedio entre los estratos).

ϕ = ángulo de fricción interna (promedio entre los estratos).

Los datos H , p_u , p , x , C , ϕ , se incorporan en el programa Maple para analizar el modelo del talud por teoría del colapso utilizada en rotura espiral logarítmica.

Al introducir estos datos básicos se realiza la derivada con respecto a el ángulo de la cresta “ θ_0 ” y del pie del talud “ θ_h ”, aplicando la ecuación 19 y así

obtener los valores de θ_0 y θ_h , que permiten calcular el coeficiente sísmico horizontal mínimo " K_C " (con la ecuación 18) que hace colapsar el modelo del talud en estudio, como también la distancia de retiro " L ", la cual es la longitud en metros que representa la distancia desde el borde del talud que colapsaría si actuase un sismo con el coeficiente sísmico horizontal mínimo calculado, todos estos valores por la teoría de colapso utilizada en rotura espiral logarítmica.

Después de obtener los parámetros y resultados por teoría del colapso utilizada en rotura espiral logarítmica se realiza la tabulación de estos valores (ver Tabla 17.)

www.bdigital.ula.ve

Tabla 17. Valores de parámetros y resultados en Teoría de Colapso utilizada en rotura espiral logarítmica

Teoría de Colapso utilizada en rotura espiral logarítmica										
Modelo	H (m)	C (kn/m ²)	ϕ (grados)	γ (kn/m ³)	θ_0 (radianes)	θ_h (radianes)	K _C	R (m)	L (m)	
LR5A	45	11,86	23,71	16,2	1,5377	4,3068	0	11	15	
LR6A	27,2	16,00	28,00	16,9	1,7900	4,3830	0,75	5,75	6,13	
LR7A	26,3	18,87	31,59	17,9	2,0135	4,4047	0,56	5,22	4,7	
LR8A	60,1	70,24	36,00	21,1	2,3048	4,4627	0,31	11,15	5,7	
LR9A	66	18,51	33,32	17,8	2,0684	4,3347	0	13,170	15,3	
LR10A	15,4	7,00	36,00	20,0	2,2315	4,3625	0,64	2,96	2,95	
LR18	70,1	59,31	36,23	20,7	2,2862	4,4183	0,45	13,18	9,6	
LR28	4,9	9	24	17,4	1,6262	4,6781	0,17	0,99	0,08	
LR30	39,5	19,93	33,59	17,4	2,1084	4,3746	0,63	7,73	7,58	

La Tabla 17. muestra resultados relevantes como:

- Para los modelos LR5A (Facultad de Forestal) y LR9A (Facultad de Medicina) el coeficiente sísmico horizontal es cero, confirmando, como se determinó en el método de equilibrio límite en estado seco, que no requiere de un factor detonante, en este caso un sismo, para causar el colapso del talud.
- Los coeficientes sísmicos horizontales obtenidos están en un rango de 0 a 0,75.
- Los modelos LR5A (Facultad de Forestal) y LR9A (Facultad de Medicina), son los que exigen mayor distancia de retiro, de 15 y 15,3 metros respectivamente.
- Las distancias de retiro son de significativa menor magnitud que las obtenidas por el método de equilibrio límite, teniendo un rango de 0 a 32,4 metros.
- Se puede observar la influencia de cada parámetro en el retiro resultante. Existen modelos con poca magnitud en sus parámetros resistentes (cohesión y ángulo de fricción interna) pero con poca distancia de retiro, esto es debido a la muy baja altura “H” de la rotura, y por lo tanto poca demanda en el cálculo de estabilidad del talud, como es el caso del modelo LR28 (sector Zumba), asimismo, se observa el caso contrario de altos valores en los parámetros resistentes, con una distancia de retiro significativa, y es debido a la gran altura “H” de la rotura, como el modelo LR18 (aeropuerto Alberto Carnevalli).

3.6.2 Aplicación de la Teoría de Colapso utilizada en rotura plana.

Posteriormente la teoría de colapso, se analiza los modelos por rotura plana con el programa matemático Maple, usando las ecuaciones 20 y 21. A diferencia de rotura espiral en este caso se requiere conocer el ángulo β que es la inclinación entre la horizontal y la cara del talud en la parte inferior

y en contacto con la rotura conocida (conseguida con el programa Slide en estado seco). El ángulo $\alpha = \theta_p$ es la inclinación de la rotura con respecto a la horizontal. (Ver Figura 29)

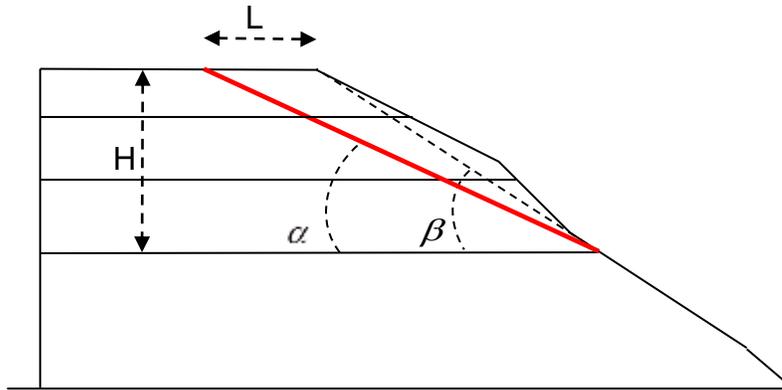


Figura 29. Parámetros para usar teoría de colapso, rotura plana.

Parámetros resistentes necesarios para analizar por teoría de colapso utilizada en rotura plana cada modelo del talud:

H = Altura de la rotura. (Obtenida en el programa Slide)

p_u = Peso unitario.

p = Carga externa sobre el talud (para la presente investigación es nula).

x = Factor de sobrecarga.

C = Cohesión (promedio entre los estratos).

ϕ = ángulo de fricción interna (promedio entre los estratos).

α = ángulo de inclinación entre la horizontal y la cara del talud en la parte inferior y en contacto con la rotura conocida.

Los datos H, p_u , p , x , C , ϕ , α se incorporan en el programa Maple para analizar el modelo del talud por teoría del colapso utilizada en rotura plana.

Al introducir estos datos básicos se realiza la derivada con respecto al ángulo de inclinación de la rotura " θ_p " (ver ecuación 21) y así obtener el valor de θ_p , que permite calcular el mínimo coeficiente sísmico horizontal " K_C " que

hace colapsar el modelo del talud en estudio con la ecuación 20, como también la distancia de retiro “L”, la cual se obtiene por relación geométrica, ya que se obtendría al proyectar la línea recta que representa la rotura, con la inclinación determinada ($\theta_p=\alpha$) e intersectar la corona del talud en estudio, todos estos valores por la teoría de colapso utilizada en rotura plana.

Los parámetros necesarios para la aplicación de la teoría de colapso utilizada en rotura plana y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores de parámetros y resultados en Teoría de Colapso utilizada en rotura plana

Teoría de Colapso utilizada en rotura plana								
Modelo	H (m)	α (grados)	C (kn/m ²)	ϕ (grados)	γ (kN/m ³)	$\theta_p=\alpha$ (grados)	K _C	L (m)
LR5A	45	39	11,86	23,71	16,2	31,13	0	18,2
LR6A	27,2	45	16,00	28,00	16,9	33,01	0,12236	14,3
LR7A	26,3	35	18,87	31,59	17,9	28,98	0,26096	11,5
LR8A	60,1	35	70,24	36,00	21,1	24,21	0,45761	67,9
LR9A	66	58	18,51	33,32	17,8	49,44	0	15,0
LR10A	15,4	36	7,00	36,00	20,0	27,72	0,29720	8,2
LR18	70,1	52	59,31	36,23	20,7	38,93	0,18287	33,5
LR28	4,9	51	9	24	17,4	28,78	0,31412	4,8
LR30	39,5	35	19,93	33,59	17,4	25,64	0,31168	19,2

En la Tabla 18 se evidencia lo siguiente:

- Para los modelos LR5A (Facultad de Forestal) y LR9A (Facultad de Medicina) el coeficiente sísmico horizontal es cero, por lo tanto queda en evidencia que no se requiere de un evento detonante, como un

sismo, para causar el colapso de estos dos modelos del talud, y el resto de los modelos del talud varían entre 0,12 y 0,46 para este parámetro.

- Además se observa las distancias de retiro “L” están comprendidas entre 4,8 y 67,9 metros.
- Es evidente que los modelos con grandes distancias de retiro se debe a la relación de ángulo α y la altura de la rotura “H”, ya que si resulta una combinación de valor bajo del ángulo con una gran altura, se obtiene una distancia de retiro importante.

3.6.3 Aplicación de la Teoría de Colapso utilizada en rotura circular

A diferencia del método de teoría de colapso utilizada en rotura espiral logarítmica y rotura plana, este, por rotura circular, no tiene ecuaciones que lo fundamenten, por lo tanto es importante aclarar que es una aproximación hecha en la presente investigación. Dicha aproximación consiste en adaptar las ecuaciones del método de teoría de colapso utilizada en rotura espiral logarítmica, a una rotura circular, fijando el parámetro “R” radio, como dato ya conocido por el método de equilibrio límite, en estado seco, ya que por este método se aplica el mismo tipo de rotura circular.

Por el método de teoría de colapso utilizada en rotura circular, se encuentra el coeficiente horizontal sísmico “ K_c ” que hace colapsar el modelo del talud en estudio, con las condiciones resultantes del método de equilibrio límite, en estado seco,. Primero se debe conocer las características de la rotura como son: θ_0 y θ_h , los cuales son los ángulos de la cresta y del pie del talud (ver Figura 28), altura de la rotura “H”, cohesión “C”, ángulo de fricción interna “ ϕ ”, y peso específico del material “ γ ”. Estos parámetros determinados por el método de equilibrio límite, en estado seco, se introducen en el programa Maple usando desde la ecuación 9 a la 19 adaptadas a una rotura circular.

Con la ecuación 18 se determina “ K_c ” usando el programa Maple.

Los valores obtenidos en cada modelo se observan en la Tabla 19

Tabla 19. Valores de parámetros y resultados por Teoría de Colapso utilizada en rotura circular

Teoría de Colapso utilizada en rotura circular										
Modelo	H (m)	L (m)	C (kn/m ²)	ϕ (grados)	γ (kN/m ³)	R (m)	θ_0 (grados)	θ_h (grados)	K_c	
LR5A	45	80	11,86	23,71	16,2	322	54	72	0	
LR6A	27,2	0	16,00	28,00	16,9	45,2	22	78	0,21	
LR7A	26,3	0	18,87	31,59	17,9	75,7	39	78	0,23	
LR8A	60,1	0	70,24	36,00	21,1	135	32	79	0,24	
LR9A	66	50	18,51	33,32	17,8	151	33	71	0	
LR10A	15,4	0	7,00	36,00	20,0	30,9	28	80	0,16	
LR18	70,1	0	59,31	36,23	20,7	112,8	19	70	0,39	
LR28	4,88	0	9	24	17,4	32,76	48	61	0,56	
LR30	39,5	0	19,93	33,59	17,4	137,9	42	76	0,26	

En la Tabla 19 se evidencia lo siguiente:

- Los modelos del talud en LR5A (Facultad de Forestal) y LR9A (Facultad de Medicina) no requieren coeficiente sísmico horizontal

“Kc” para colapsar, y son los únicos con distancias de retiro, 80 y 50 metros respectivamente, por lo tanto son los modelos de talud mas inestables.

- A excepción de los dos modelos mas inestables LR5A (Facultad de Forestal) y LR9A (Facultad de Medicina) el rango de coeficiente sísmico horizontal del talud varían entre 0,16 y 0,56.
- El modelo LR28 (sector Zumba) resulta el más estable para el método de teoría de colapso utilizada en rotura circular, ya que es el modelo que exige mayor magnitud de coeficiente horizontal sísmico para producir su colapso. Esto puede deberse a la poca altura de la rotura “H”.

3.7 Cálculo variacional aplicado a la estabilidad de taludes

El método de cálculo variacional se aplica con la ayuda del programa Maple como herramienta, se debe conocer los parámetros como: “Kc” el cual es coeficiente sísmico horizontal de sismo que hace colapsar el talud calculado, obtenido por la teoría de colapso por método de rotura espiral logarítmica y rotura plana, la pendiente del talud solo en el área concerniente a la rotura conocida, altura de la rotura, cohesión, ángulo de fricción, y peso unitario del material.

Este método permite encontrar la longitud de retiro en metros, para el menor factor de seguridad posible, aplicando un coeficiente horizontal sísmico obtenido de la teoría de colapso, como se explicó en el párrafo anterior. Cabe destacar, que el mencionado mínimo factor de seguridad obtenido es practicamente igual a 1 en casi todos los casos porque se está modelando el comportamiento del talud en el estado límite en que fallaría.

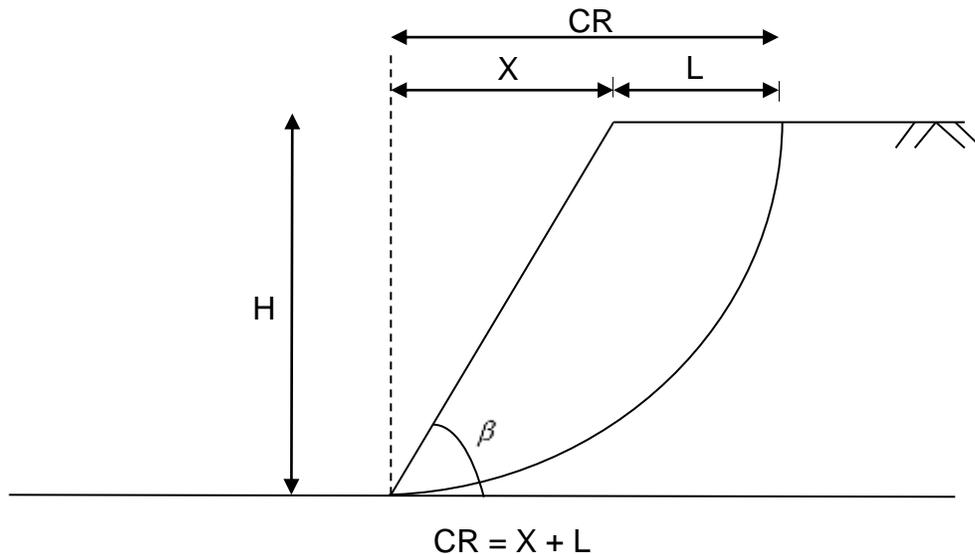


Figura 30. Variables principales para aplicar el método de cálculo variacional

Observando la relación entre las variables de la Figura 30, se puede iniciar la obtención de los parámetros necesarios para aplicar el método de cálculo variacional, los cuales son:

- - H = altura de la rotura.
- - r = número de rebanadas (valor fijo para todos los modelos).
- - C = Cohesión del talud. (promedio calculada).
- - ϕ = ángulo de fricción interna (promedio entre los estratos).
- - pu = peso unitario (promedio calculado)
- - Kh= Coeficiente sísmico horizontal.
- - m = pendiente del talud.

3.7.1 Cálculo variacional utilizada en rotura circular

El método de cálculo variacional utilizada en rotura circular se inicia programando las ecuaciones 22, 23, 24 y 25 en Maple, así como también los parámetros indicados en el párrafo anterior. Primero se itera el valor de "CR/H", el cual es un valor que relaciona dos parámetros geométricos, la

altura con la cresta del talud, como se observa en la Figura 30, hasta obtener el factor de seguridad lo más cercano a 1, entonces se obtiene el valor de CR/H para un FS aproximadamente igual a 1.

Posteriormente se calcula por relaciones geométricas (basándose en la Figura 30) el valor de “X” y “L”, este último representa la distancia en metros de retiro del borde del talud.

En el método de cálculo variacional utilizada en rotura circular, no se determinaron todos los valores deseados, debido a que el método numérico utilizado posee algunas limitantes que condicionan el desarrollo con este tipo de rotura. Se expresan los resultados obtenidos en la Tabla 20.

Tabla 20. Factor de seguridad y retiro obtenido por cálculo variacional, rotura circular.

Modelo	H (m)	CR/H (adimensional)	X (m)	L (m)	F.S.
LR5A	45	1,16	17,38	5,008	0,7
LR6A	27,2	0,93	21,2	-1,484	1,03
LR10A	15,4	0,8	15,4	-3,08	1,96
LR18	70,1	1,16	17,38	5,008	0,7
LR28	4,9	0,93	21,2	-1,484	1,03

En la Tabla 20 se observa lo siguiente:

- La falta de resultados en 4 modelos (LR7A, LR8A, LR9A Y LR30) debido a que no se obtuvieron valores al aplicar el método de cálculo variacional por rotura circular.
- Solo se obtuvo en el modelo LR6A (avenida Universidad) Y LR28 (sector Zumba) un factor de seguridad igual o cercano a 1, el cual es el parámetro necesario a para validar la iteración de la relación CR/H.
- Asimismo, los valores de retiro “L” no son confiables.

3.7.2 Cálculo variacional utilizada en rotura plana

Posteriormente se aplica el método de cálculo variacional considerando rotura plana. Se debe conocer los parámetros de la Figura 30, para usar el programa Maple y usar las ecuaciones 22, 23, 24 y 25.

Para este caso se realizan las mismas iteraciones que en el método de cálculo variacional utilizada en rotura circular. Sin embargo, cambia la forma de la curva que utiliza, para la rotura plana es la ecuación de una recta. En el caso anterior de rotura circular la forma de la curva es parte de un círculo.

Los resultados obtenidos para el método de cálculo variacional utilizada en rotura plana se muestran en la Tabla 21.

De la Tabla 21 se observa que el método de cálculo variacional utilizada en rotura plana termina siendo de gran utilidad en la presente investigación, obteniendo distancias de retiro que van desde 0 hasta casi 14 metros, para el factor de seguridad aproximadamente igual a 1 (los buscados por ser el estado límite de estabilidad), a excepción del modelo del talud LR9 (Facultad de Medicina) que es el cual arrojó un valor de $FS = 0,75$.

Tabla 21. Factor de seguridad y retiro obtenido por cálculo variacional, rotura plana

Parámetros relacionados con el método de cálculo variacional, rotura plana											
Modelo	H (m)	α (grados)	C (kn/m ²)	ϕ (grados)	γ (kN/m ³)	m	Kc	CR/H (adimensional)	X (m)	L (m)	F.S. (adimensional)
LR5A	45	39	11,86	23,71	16,2	0,81	0	1,29	55,57	2,48	1,09
LR6A	27,2	45	16,00	28,00	16,9	1	0,12	1,21	27,2	5,712	1,00
LR7A	26,3	35	18,87	31,59	17,9	0,7	0,26	1,40	37,56	0	1,15
LR8A	60,1	35	70,24	36,00	21,1	0,7	0,46	1,66	85,83	13,93	0,98
LR9A	62	58	18,51	33,32	17,8	1,6	0	0,54	38,74	0	0,75
LR10A	15,4	36	7,00	36,00	20,0	0,73	0,30	1,58	21,2	3,136	0,99
LR18	70,1	52	59,31	36,23	20,7	1,28	0,18	0,9	54,77	8,322	0,98
LR28	4,9	51	9	24	17,4	1,23	0,31	0,86	3,968	0,246	1,02
LR30	39,5	35	19,93	33,59	17,4	0,7	0,31	1,56	56,41	5,208	0,99

3.8 Retiro en el borde de la terraza de Mérida.

Al realizar el análisis de estabilidad de talud a lo largo de todo el borde de la terraza de la ciudad de Mérida, se obtiene diferentes resultados y a continuación se expresan los rangos por método y tipo de rotura:

- Método de equilibrio límite, estado seco, resulta un rango de retiro de 0 a 40 metros.
- Método de equilibrio límite, estado saturado, resulta un rango de retiro de 0 a 166 metros.
- Método de equilibrio límite, con carga sísmica, resulta un rango de retiro de 0 a 89 metros.
- Método de teoría de colapso utilizada en rotura espiral logarítmica, resulta un rango de retiro de 0 a 32,4 metros.
- Método de teoría de colapso utilizada en rotura plana, resulta un rango de retiro de 4,8 a 67,9 metros.
- Método de teoría de colapso utilizada en rotura circular, resulta un rango de retiro de 0 a 140 metros.
- Método de cálculo variacional utilizada en rotura circular no se determinaron retiros.
- Método de cálculo variacional utilizada en rotura plana resulta un rango de retiro de 0 a 13,9 metros.

De las distancias de retiro calculadas por los distintos métodos mostrados en la presente investigación se seleccionan 3 métodos para la construcción de tres mapas de retiro con el software ArcGIS y realizando interpolación con funciones Spline para interpolar las distancias de retiro entre cada modelo de talud en estudio (ver Figura 31, 32 y 33), que ilustran resultados con una significativa diferencia.

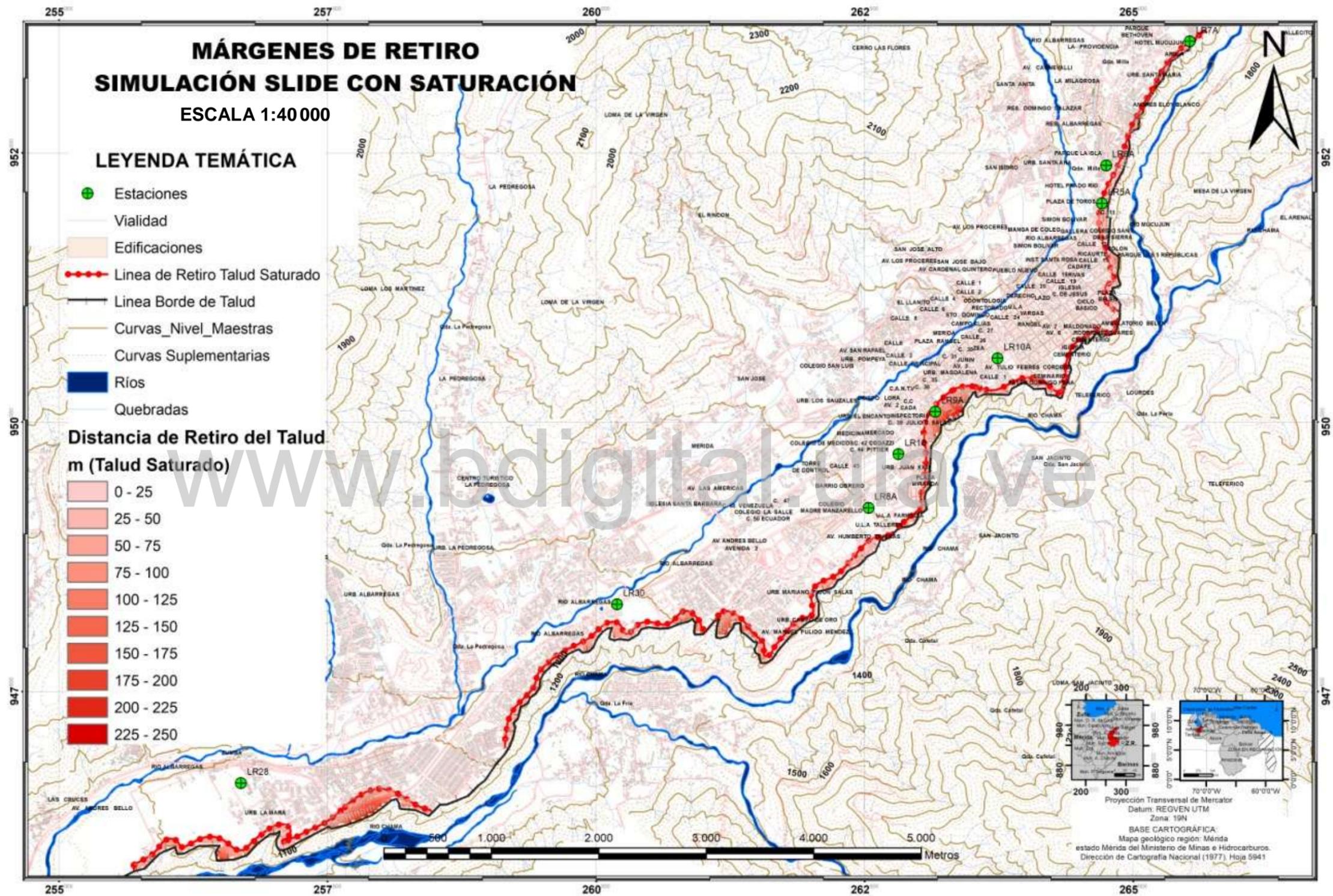


Figura 31. Mapa de Retiro del borde de la terraza de Mérida, método de equilibrio límite, estado saturado 100 %

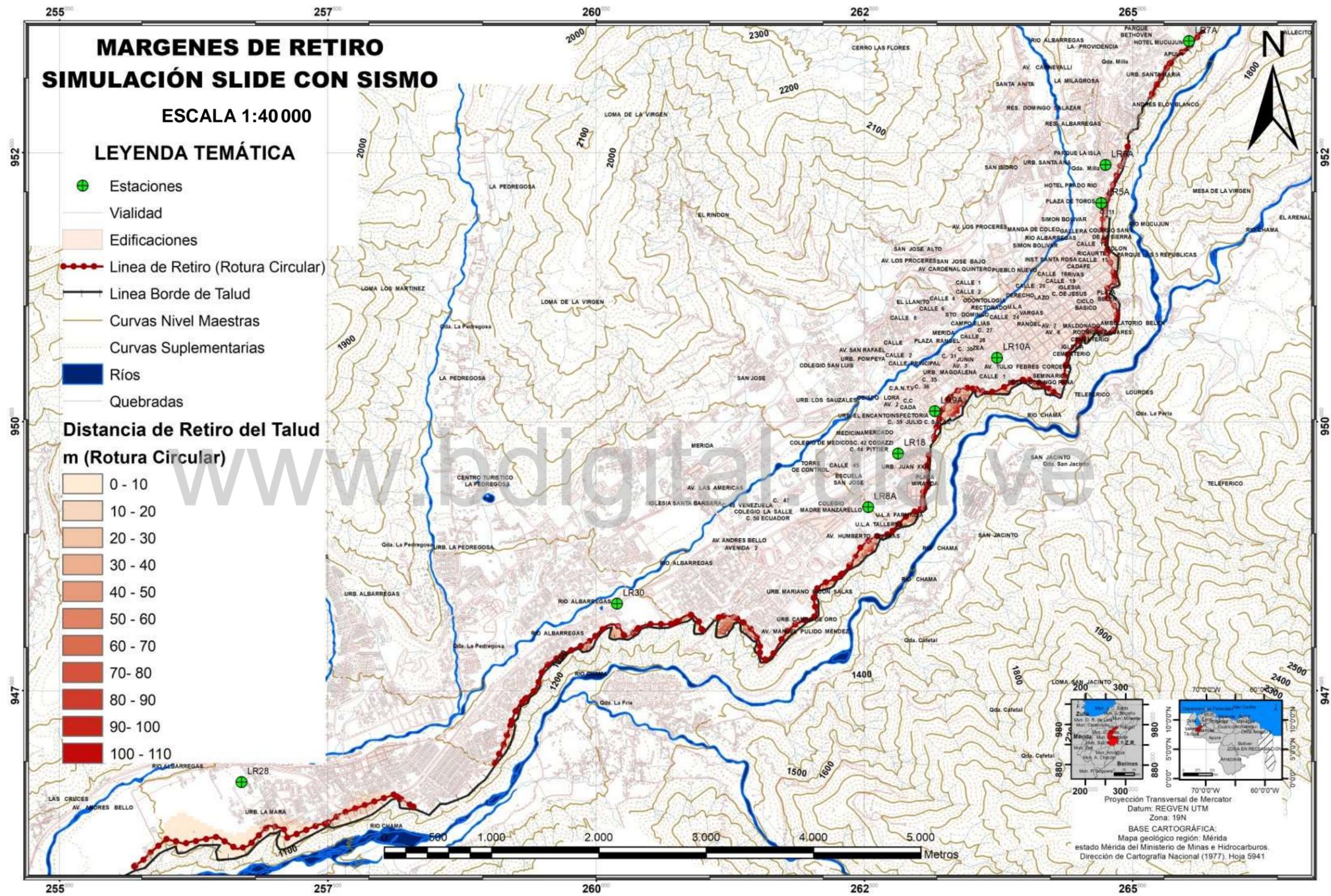


Figura 32. Mapa de Retiro del borde de la terraza de Mérida, método de equilibrio límite, con carga sísmica, $K_h=0,3$

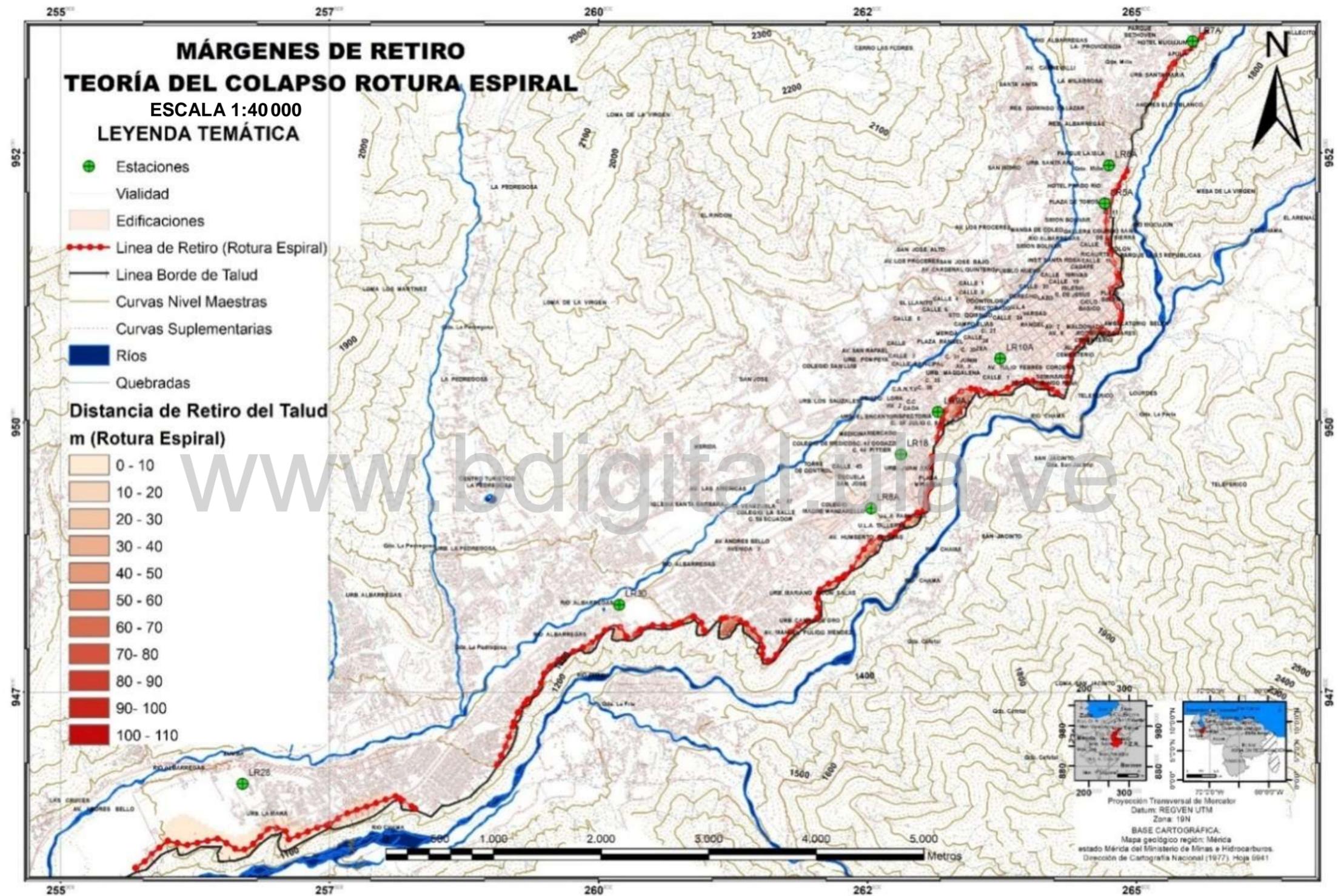


Figura 33. Mapa de Retiro del borde de la terraza de Mérida, por teoría del colapso, rotura espiral

3.9 Estudio de vulnerabilidad geotécnica en el borde de la terraza de Mérida

La vulnerabilidad se analiza en la presente investigación según el grado de probabilidad de pérdida humana, física y económica (ver Tabla 2 y 3). Se estudia el índice de probabilidad de ocurrencia de cada uno de los casos, si llegase a suceder un deslizamiento o colapso del talud del borde de la terraza de la ciudad de Mérida. La probabilidad obtenida para los 3 casos se promedia, resultando un solo índice de vulnerabilidad, el cual será ilustrado en un mapa de vulnerabilidad geotécnica, que abarca un área que está en función de la distancia de retiro determinada según los métodos de equilibrio límite, en estado saturado y con carga sísmica, además del método por rotura espiral logarítmica por teoría de colapso.

El alcance de la vulnerabilidad se realiza en función del retiro desde la corona del talud en dirección a la meseta de la ciudad de Mérida. Se realizan tres mapas de vulnerabilidad con tres distancias de retiro "L" obtenidas de los métodos de equilibrio límite, en estado saturado y con carga sísmica (ver Tabla 15), además por rotura espiral logarítmica por el método de teoría de colapso (ver Tabla 17).

La construcción de los 3 mapas de vulnerabilidad con el software ArcGIS según los métodos de equilibrio límite, en estado saturado y con carga sísmica, además de rotura espiral logarítmica por teoría de colapso, se pueden ver en las Figura 34, 35 y 36 respectivamente.

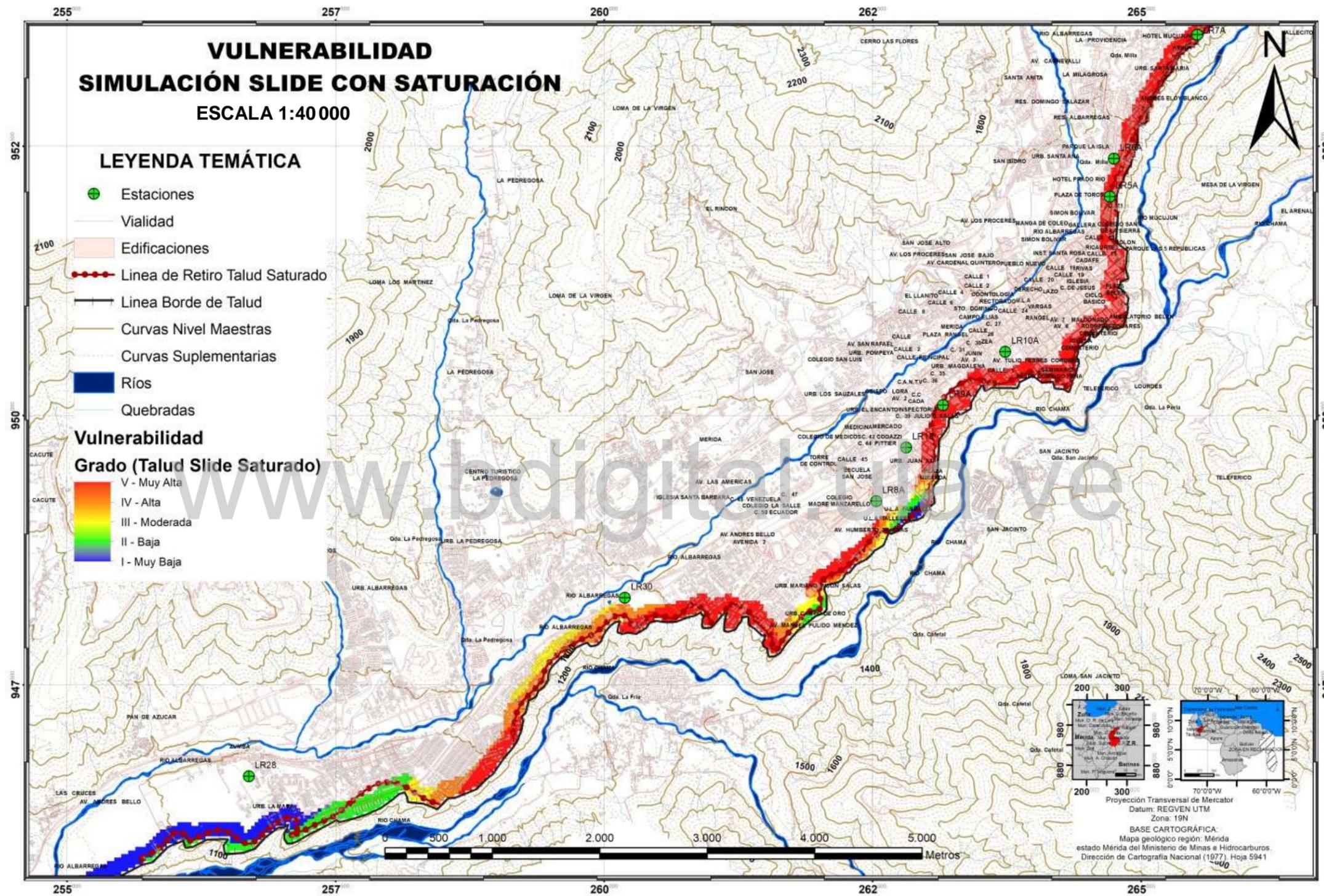


Figura 34. Mapa de Vulnerabilidad del borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, estado saturado 100%

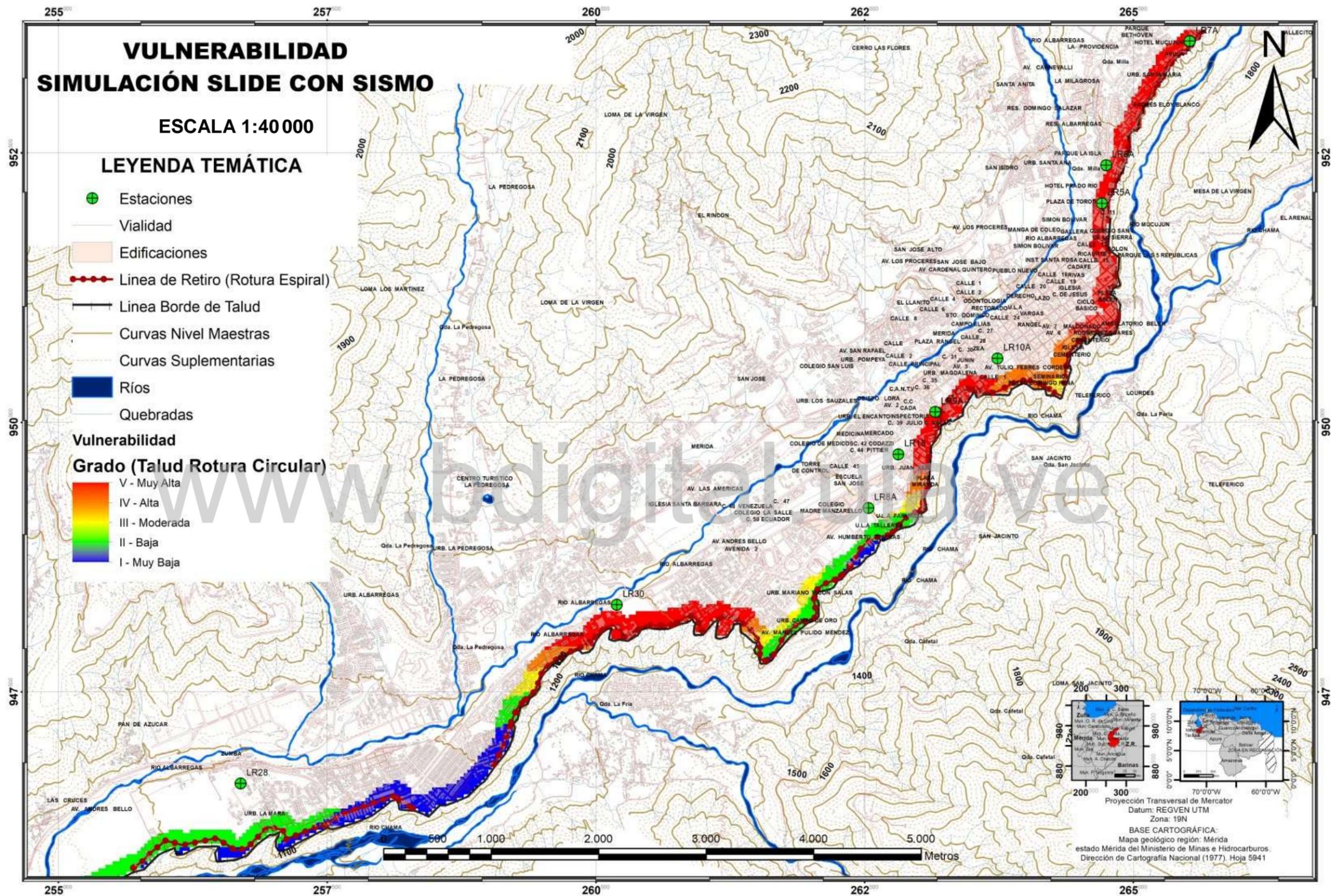


Figura 35. Mapa de Vulnerabilidad del borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, con carga sísmica $K_h=0,3$

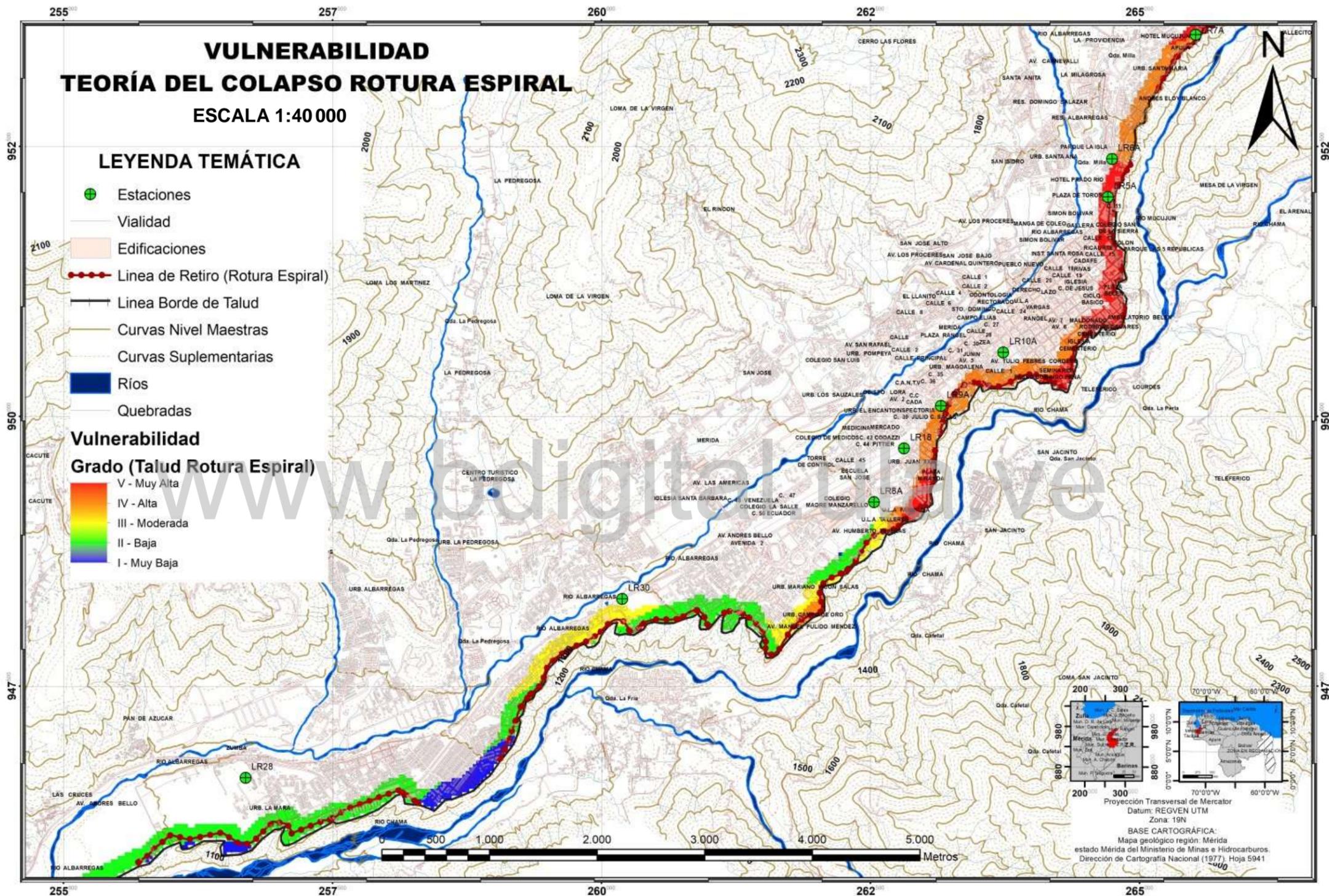


Figura 36. Mapa de Vulnerabilidad del borde de la terraza de Mérida, por teoría del colapso, rotura espiral

En las Figura 34, 35 y 36 se observan cambios de vulnerabilidad a lo largo del borde de la terraza, debidos a la presencia o ausencia de actividad humana, de estructuras y vialidad.

En la Figura 34 se muestra la vulnerabilidad geotécnica por el método de equilibrio límite en estado saturado, la cual arroja muy alta vulnerabilidad geotécnica en el borde de la terraza de la ciudad de Mérida en todo el recorrido desde el sector “Santa Elena” (zona central del mapa) hasta el sector “Vuelta de Lola” (zona superior del mapa), ya que son zonas altamente pobladas en el borde y en algunos puntos en la propia cara del talud en estudio. En el sector donde se ubica la Facultad de Farmacia de la Universidad de los Andes, hay baja vulnerabilidad ya que existe un área con terrenos despoblados, con poca infraestructura y vialidad. La zona baja de la ciudad tiene alta y muy alta vulnerabilidad, hasta llegar al sector “Zumba” el cual tiene áreas despobladas y por lo tanto con muy baja vulnerabilidad geotécnica.

En la Figura 35 se muestra la vulnerabilidad geotécnica por el método de equilibrio límite con carga sísmica, la cual arroja muy alta vulnerabilidad geotécnica en el borde de la terraza de la ciudad de Mérida en todo el recorrido desde el sector “Santa Elena” (zona central del mapa) hasta el sector “Vuelta de Lola” (zona superior del mapa), al igual que el estado de saturación 100%, ya que son zonas altamente pobladas en el borde y en algunos puntos en la propia cara del talud en estudio. Desde el sector donde se ubica la Facultad de Farmacia de la Universidad de los Andes, hasta la avenida Manuel Pulido Méndez, hay baja vulnerabilidad ya que existe un área con terrenos despoblados, con poca infraestructura, vialidad y además en esta zona en específico hay menor distancia de retiro con respecto al estado de saturación 100%. El borde de la terraza tomando como referencia la avenida Andrés Bello, tiene alta vulnerabilidad desde el sector Santa

Juana hasta el sector Las Tapias. Desde el sector Las Tapias hasta el sector Zumba la vulnerabilidad es baja ya que tiene áreas despobladas.

En la Figura 36 se muestra la vulnerabilidad geotécnica por el método de rotura espiral logarítmica por teoría de colapso, la cual arroja desde alta a muy alta vulnerabilidad geotécnica en el borde de la terraza de la ciudad de Mérida en todo el recorrido desde el sector donde se ubica la Facultad de Farmacia de la Universidad de los Andes (zona central del mapa), hasta el sector “Vuelta de Lola” (zona superior del mapa), ya que son zonas altamente pobladas en el borde y en algunos puntos en la propia cara del talud en estudio. Cabe acotar que a diferencia del mapa de vulnerabilidad geotécnica por el método de equilibrio límite en estado saturado, este cubre áreas de menor magnitud ya que las distancias de retiro con el cual es construido el mapa, son menores. Desde la zona central del mapa hasta la zona baja del mismo, es decir desde la avenida Humberto Tejas hasta el sector “Zumba” se tiene moderada, baja y muy baja vulnerabilidad, esto se debe al poco alcance de las distancias de retiro usadas que no llegan abarcar las zonas pobladas de esta zona de la ciudad y además a las áreas despobladas y por lo tanto con muy baja vulnerabilidad geotécnica.

3.10 Estudio de Amenaza en el borde de la terraza de Mérida

El estudio de amenaza en el borde de la terraza de la ciudad de Mérida, se fundamenta en la clasificación de cada modelo del talud según su factor de seguridad, basándose en la Tabla 5, donde se observa que el evento detonante puede ser causado por una carga dinámica (un sismo), o por cargas estáticas. Para la presente investigación se fija dos métodos, el de equilibrio límite en estado saturado, y con carga sísmica $K_h=0,3$, para la determinación de dos grados de amenazas independientes.

Todos los modelos en estudio del talud en estado estático saturado, tienen un factor de seguridad menor a 1,2 (ver Tabla 13) por lo tanto para

está condición existe la presencia de amenaza alta según la Tabla 5 en todos los modelos del talud en la presente investigación.

Todos los modelos del talud en estado dinámico, cargados con un coeficiente sísmico horizontal de $K_h=0,3$, tienen un factor de seguridad menor a 1,0 (ver Tabla 14), por lo tanto para esta condición según la Tabla 5 existe amenaza alta en todos los modelos del talud.

Se construyen dos mapas de amenaza con el software ArcGIS en el borde de la terraza de la ciudad de Mérida, según los métodos de equilibrio límite en estado saturado, y con carga sísmica $K_h=0,3$, ver Figura 37 y 38.

www.bdigital.ula.ve

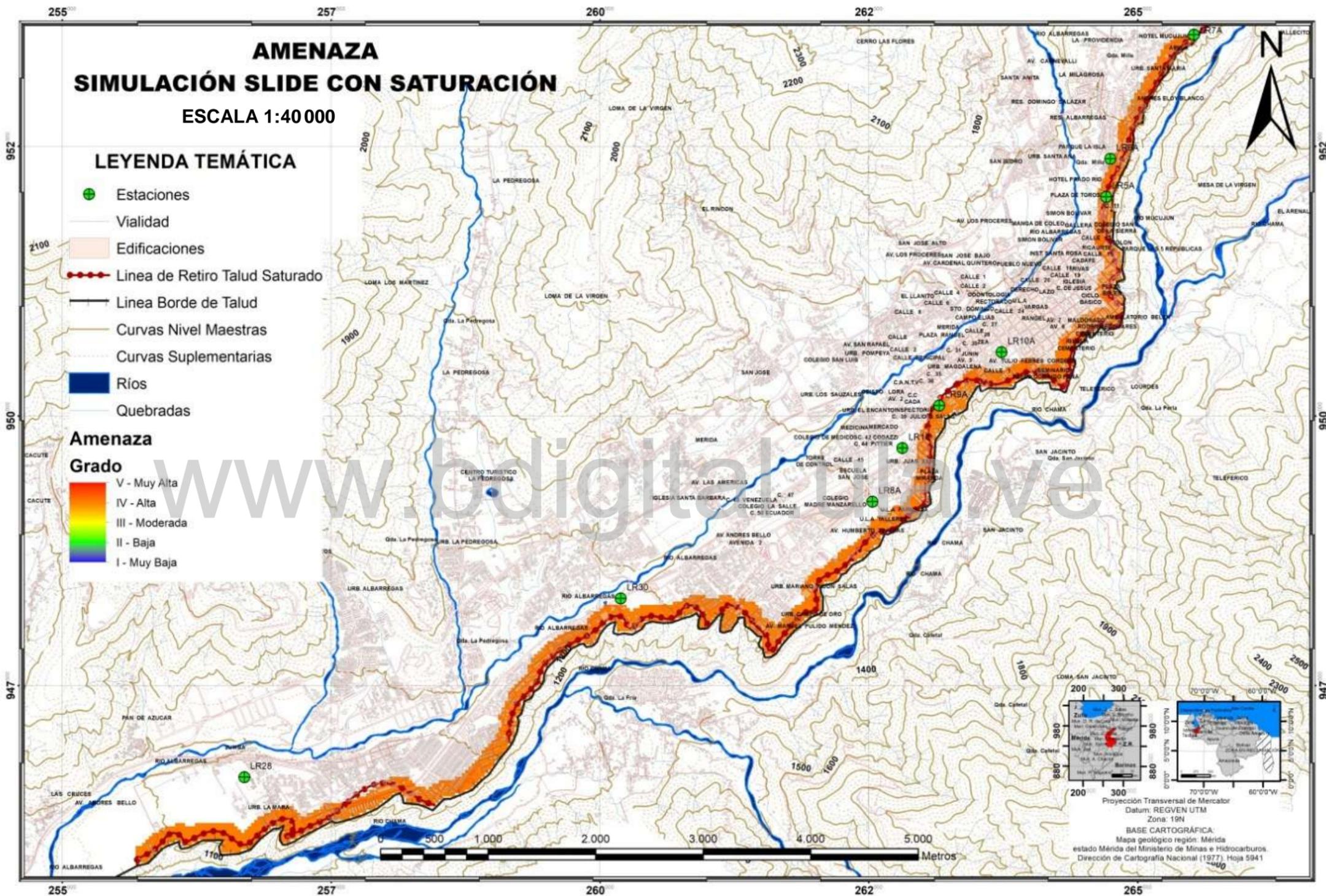


Figura 37. Mapa de amenaza en el borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, estado saturado 100%

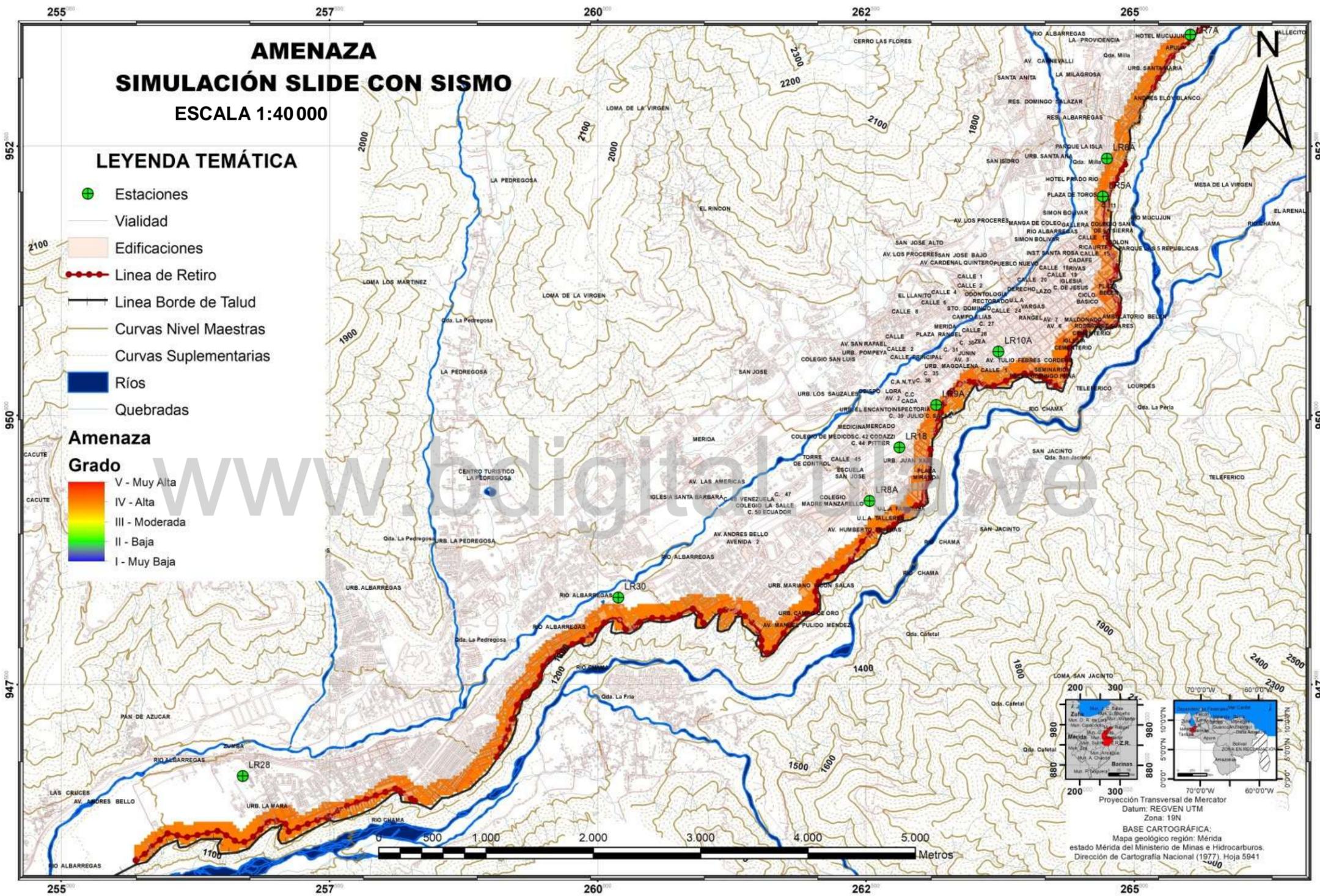


Figura 38. Mapa de amenaza en el borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, con carga sísmica $K_h=0,3$

En las Figura 37 y 38 se observan dos mapas de amenaza que expresan resultados importantes y muy simples, ya que existe el mismo grado de amenaza a lo largo de todo el borde de la terraza, esta es, alta, para una distancia de retiro según los métodos: equilibrio límite en estado saturado retiro que varía desde 0 a 166 metros, y con carga sísmica ($K_h=0,3$) retiro que varía desde 0 a 89 metros.

3.11 Estudio de Riesgo en el borde de la terraza de Mérida

Al realizar un solape de mapas de vulnerabilidad y amenaza en el área analizada, se obtiene el mapa de riesgo, el cual muestra 5 grados de posibilidad, muy alto, alto, moderado, bajo, y muy bajo. Además, al ya conocer que la amenaza es del mismo grado en toda el área en estudio, se facilita y es evidente observar que el factor que hace variar el grado de riesgo, es la vulnerabilidad en la presente investigación.

Se construyen dos mapas de riesgo con el software ArcGIS en el borde de la terraza de Mérida, según los métodos de equilibrio límite, en estado saturado y con carga sísmica $K_h=0,3$, ver Figura 39 y 40.

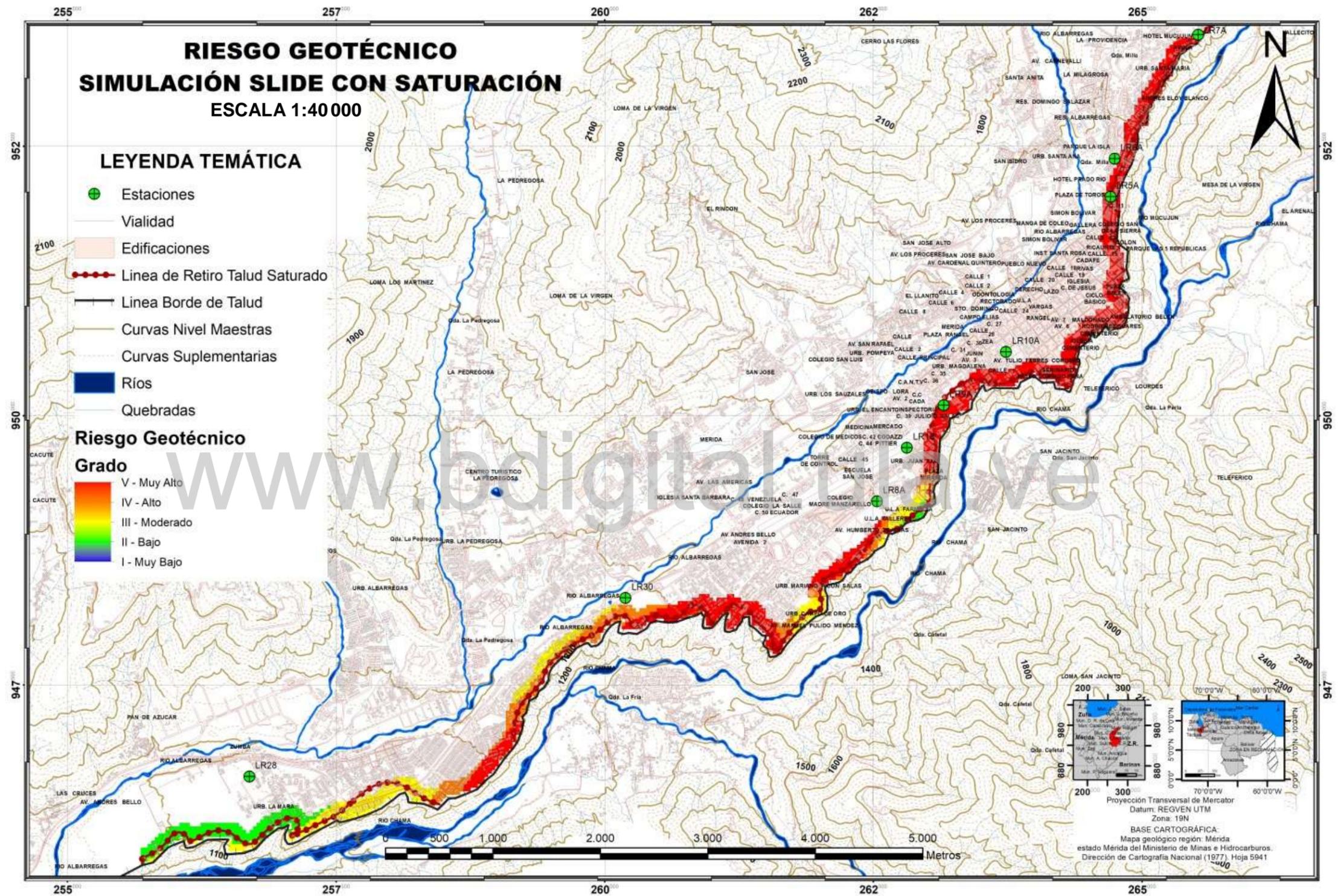


Figura 39. Mapa de riesgo en el borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, estado saturado 100%

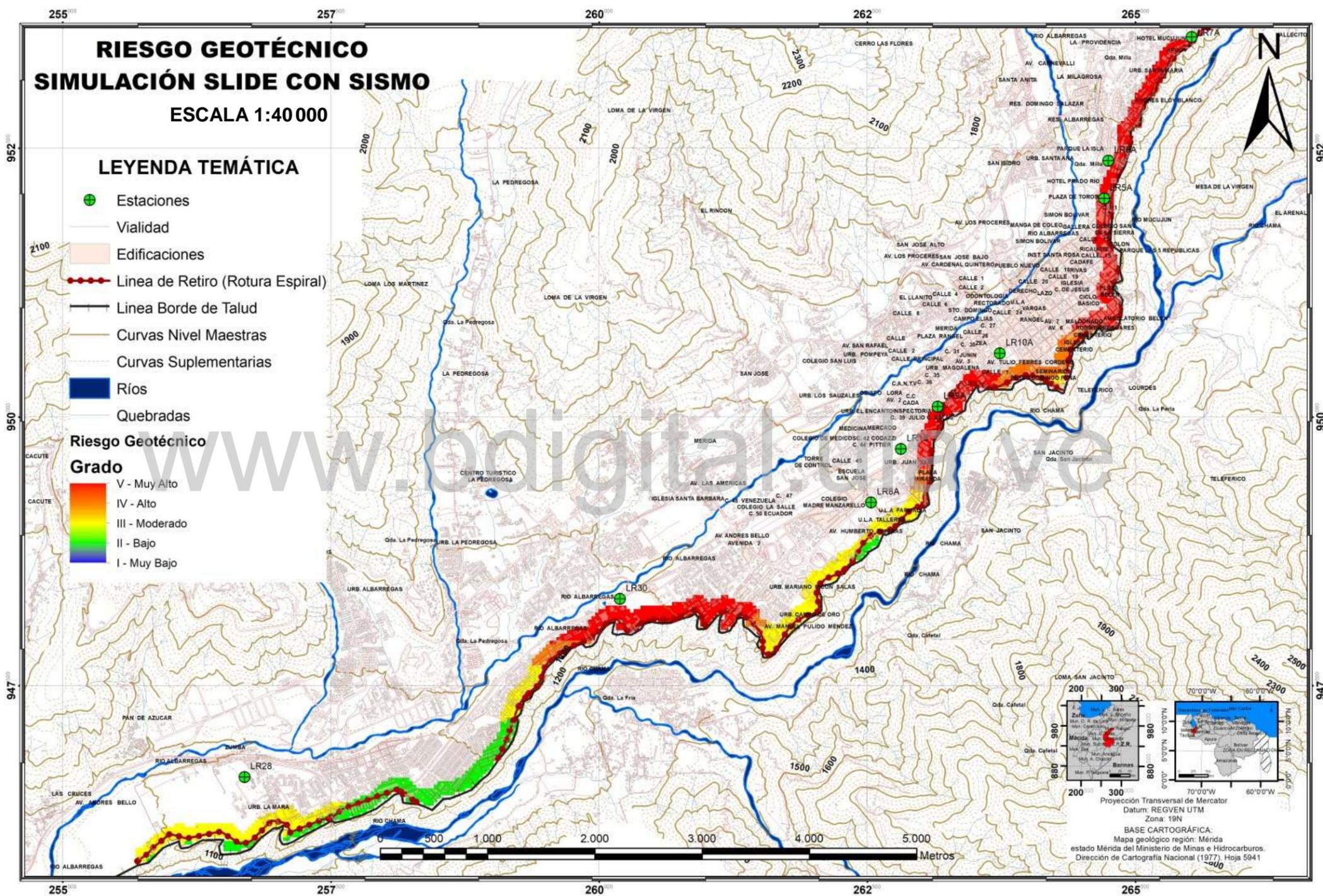


Figura 40. Mapa de riesgo en el borde de la terraza de Mérida, por método de equilibrio límite, con carga sísmica $K_h=0,3$.

La Figura 39 muestra el riesgo por el método de equilibrio límite en estado saturado, observándose un alto riesgo a lo largo del borde de la terraza de la ciudad de Mérida desde el sector “Santa Elena” hasta el sector “Vuelta de Lola”, donde la ciudad está más densamente poblada. Existe un riesgo moderado en los siguientes sectores: Facultad de Farmacia, avenida Manuel Pulido Méndez, urbanización “Las Tapias”, y urbanización “El Carrizal”. Además existe muy bajo riesgo en el sector “Zumba” el cual tiene una gran área de terreno sin poblar.

La Figura 40 muestra el riesgo por el método de equilibrio límite con carga sísmica, la cual arroja alto y muy alto riesgo en el borde de la terraza de la ciudad de Mérida en todo el recorrido desde el sector “Santa Elena” (zona central del mapa) hasta el sector “Vuelta de Lola” (zona superior del mapa), al igual que el estado de saturación 100%, ya que son zonas altamente pobladas en el borde y en algunos puntos en la propia cara del talud en estudio. Desde el sector donde se ubica la Facultad de Farmacia de la Universidad de los Andes, hasta la avenida Manuel Pulido Méndez, hay bajo riesgo ya que existe un área con terrenos despoblados, con poca infraestructura, vialidad y además en esta zona en específico hay menor distancia de retiro con respecto al estado de saturación 100%. El borde de la terraza tomando como referencia la avenida Andrés Bello, tiene alto riesgo desde el sector Santa Juana hasta el sector Las Tapias. Desde el sector Las Tapias hasta el sector Zumba el riesgo es bajo ya que tiene áreas despobladas.

CAPÍTULO 4

El capítulo 4 muestra los análisis de resultados obtenidos en la presente investigación, abordando lo obtenido por cada método.

4.1 Análisis de Resultados

Las distancias de retiro obtenidas cuando se aplica el método de equilibrio límite para estado de saturación 100%, varían desde 0 hasta 166 metros, lo que representa áreas realmente alarmantes como se observa en la Figura 31, ya que una importante población de la ciudad de Mérida habita y transita dicha zona.

Los modelos de talud con mayor distancia de retiro son: LR5A (Facultad de Forestal) con 81 metros y LR9A (Facultad de Medicina) con 166 metros. El modelo LR8A (sector Campo de Oro) es el único modelo que no arrojó distancia de retiro para el estado de saturación, debido a la geometría del talud, la cual muestra poco cambio de pendiente entre la cresta y la zona media de la cara del talud (ver Figura 18).

Las distancias de retiro obtenidas cuando se aplica el método de equilibrio límite con carga sísmica, varían desde 0 hasta 89 metros, lo que representa áreas realmente alarmantes como se observa en la Figura 32, ya que una importante población de la ciudad de Mérida habita y transita dicha zona. Los modelos de talud con mayor distancia de retiro son: LR5A (Facultad de Forestal) con 81 metros y LR9A (Facultad de Medicina) con 89 metros.

El modelo LR8A (sector Campo de Oro) es el único modelo que no arrojó distancia de retiro con carga sísmica debido a la geometría del talud, la cual muestra poco cambio de pendiente entre la cresta y la zona media de la cara del talud (ver Figura 18).

La distancia de retiro resultante del método rotura espiral logarítmica por teoría de colapso, resulta de menos magnitud, ya que se consiguieron

valores entre 0 y 15 metros de retiro (ver Figura 33), y de nuevo los modelos de talud con mayor distancia de retiro son: el LR5A (Facultad de Forestal) con 15 metros y LR9A (Facultad de Medicina) con 15,3 metros. El modelo de talud LR28 (sector Zumba) es el único que arrojó una distancia de retiro muy baja (0,08 metros), posiblemente debido a la poca altura de la rotura “H”.

La vulnerabilidad a lo largo del borde de la terraza es muy alta desde el centro de la ciudad (sector Santa Elena) hasta la zona norte (sector Vuelta de Lola), cuando se aplica el método de equilibrio límite para estado de saturación 100%, como se muestra en la Figura 34, esto debido a la alta densidad poblacional en el área, con alta cantidad de infraestructura y vialidad importante para el urbanismo. Además, este alto grado de vulnerabilidad abarca un área significativa de la ciudad de Mérida debido a las grandes distancias de retiro que exigen las roturas más probables en el estado de saturación del suelo. En el sector donde se ubica la Facultad de Farmacia de la Universidad de los Andes, hay baja vulnerabilidad ya que existe un área con terrenos despoblados, con poca infraestructura y vialidad. La zona baja de la ciudad tiene alta y muy alta vulnerabilidad, hasta llegar al sector “Zumba” el cual tiene áreas despobladas y por lo tanto con muy baja vulnerabilidad geotécnica.

La vulnerabilidad a lo largo del borde de la terraza es muy alta desde el centro de la ciudad (sector Santa Elena) hasta la zona norte (sector Vuelta de Lola), cuando se aplica el método de equilibrio límite con carga sísmica, como se muestra en la Figura 35, esto debido a la alta densidad poblacional en el área, con alta cantidad de infraestructura y vialidad importante para el urbanismo. Además, este alto grado de vulnerabilidad abarca un área significativa de la ciudad de Mérida debido a las grandes distancias de retiro que exigen las roturas más probables cuando se aplica carga sísmica al

suelo. Desde el sector donde se ubica la Facultad de Farmacia de la Universidad de los Andes, hasta la avenida Manuel Pulido Méndez, hay baja vulnerabilidad ya que existe un área con terrenos despoblados, con poca infraestructura, vialidad y además en esta zona en específico hay menor distancia de retiro con respecto al estado de saturación 100%. El borde de la terraza tomando como referencia la avenida Andrés Bello, tiene alta vulnerabilidad desde el sector Santa Juana hasta el sector Las Tapias. Desde el sector Las Tapias hasta el sector Zumba la vulnerabilidad es baja ya que tiene áreas despobladas.

La vulnerabilidad a lo largo del borde de la terraza por la teoría de colapso utilizando rotura espiral logarítmica, disminuye considerablemente con respecto a la condición de saturación, la causa de esta disminución son las distancias de retiro con menor alcance a zonas pobladas obtenidas por este método. Por ejemplo se puede observar en la Figura 36, como en el borde de la terraza de la ciudad de Mérida cercano a la avenida Andrés Bello, la distancia de retiro es de 8 metros, por lo que no es suficiente para afectar o hacer altamente vulnerable dicha zona. Además, se puede observar como claramente desde el centro de la ciudad (avenida Humberto Tejas) hasta la zona baja (sector Zumba) no existe alto grado de vulnerabilidad, y por el contrario el 90% de esta zona del mapa tiene un bajo grado de vulnerabilidad.

Para el grado de amenaza para el método de equilibrio límite para estado de saturación 100% y carga sísmica con $K_h=0,3$, se obtuvo el mismo resultado en todos los modelos del talud en estudio, ya que todos los factores de seguridad son inferiores a los exigidos en la Tabla 5, concluyendo así que todos los modelos están en amenaza alta como se indica en la Figura 37 y 38.

El grado de riesgo a lo largo del borde de la terraza de la ciudad de Mérida, es muy alto, desde el centro de la ciudad (sector Santa Elena), hasta la zona alta (sector Vuelta de Lola), esto cuando se aplica el método de equilibrio límite para un estado de saturación de 100% (ver Figura 39). Existe un riesgo moderado en los siguientes sectores: Facultad de Farmacia, avenida Manuel Pulido Méndez, urbanización “Las Tapias”, y urbanización “El Carrizal”. Además existe muy bajo riesgo para el estado de saturación en el talud en el sector “Zumba”, el cual tiene una gran área de terreno sin poblar.

El grado de riesgo a lo largo del borde de la terraza de la ciudad de Mérida, es muy alto, desde el centro de la ciudad (sector Santa Elena), hasta la zona alta (sector Vuelta de Lola), esto cuando se aplica el método de equilibrio límite con carga sísmica (ver Figura 40). Desde el sector donde se ubica la Facultad de Farmacia de la Universidad de los Andes, hasta la avenida Manuel Pulido Méndez, hay bajo riesgo ya que existe un área con terrenos despoblados, con poca infraestructura, vialidad y además en esta zona en específico hay menor distancia de retiro con respecto al estado de saturación 100%. El borde de la terraza tomando como referencia la avenida Andrés Bello, tiene alto riesgo desde el sector Santa Juana hasta el sector Las Tapias. Desde el sector Las Tapias hasta el sector Zumba el riesgo es bajo ya que tiene áreas despobladas.

Úcar (2010); calcula un coeficiente sísmico de diseño siguiendo los parámetros exigidos por la norma COVENIN 1756-1:2001 para cálculo de aceleración sísmica según la zona del país, y ya que esta, es la misma zona de la presente investigación, se utiliza el mismo resultado, $K_h = 0,30$, para evaluar los modelos estudiados por teoría de colapso, ya que este es el único método que muestra que valor mínimo de coeficiente sísmico

horizontal causa el colapso del modelo del talud en estudio. Entonces se demuestra que el coeficiente sísmico horizontal de diseño provoca el colapso de diferentes modelos del talud, aplicando teoría de colapso según el tipo de rotura, ya que tienen un mínimo coeficiente sísmico horizontal menor al de diseño ($K_h=0,30$) como se puede ver en las Tabla 17, 18 y 19, a continuación se muestra cuáles son estos modelos del talud:

- Por rotura espiral logarítmica, colapsan 3 modelos del talud en estudio, LR5A (Facultad de Forestal), LR9A (Facultad de Medicina), y LR28 (sector Zumba).
- Por rotura plana, colapsan 6 modelos del talud en estudio, LR5A (Facultad de Forestal), LR6A (avenida Universidad), LR7A (Vuelta de Lola), LR9A (Facultad de Medicina), LR10A (Estadio Lourdes) y LR18 (aeropuerto Alberto Carnevalli).
- Por rotura circular, colapsan todos los modelos a excepción del LR18 (aeropuerto Alberto Carnevalli) y LR28 (sector Zumba).

Cabe destacar que en los libros y manuales investigados, como es el caso del Design Guidance (1997), Duncan y Mah (2004), recomiendan utilizar en el análisis de estabilidad un valor del coeficiente sísmico horizontal $K_h = 0,50$ (a_{max}/g). Esto se debe a que las fuerzas de inercias generadas por el sismo son de corta duración y cambian de dirección muchas veces. Por lo tanto aun cuando el factor de seguridad se encuentre por un período de tiempo muy corto por debajo de la unidad, su permanencia será hasta que las cargas nuevamente se equilibren. Si se toma en cuenta dicho valor de coeficiente horizontal sísmico de $K_h=0,5$ provocaría el colapso de prácticamente todos los modelos de talud estudiados por la teoría de colapso utilizada en rotura plana y rotura circular.

Los modelos del talud LR5A (Facultad de Forestal) y LR9A (Facultad de Medicina) colapsan en estado seco y en ausencia de sismo.

Además los nueve modelos del talud analizados en la presente investigación colapsan en estado de saturación.

www.bdigital.ula.ve

Conclusiones

Después de estudiar la vulnerabilidad geotécnica del borde de la meseta de la ciudad de Mérida se puede concluir lo siguiente:

- Los modelos del talud referentes a la Facultad de Forestal y Facultad de Medicina, son los más inestables, por lo tanto, son los que exigen mayor distancia de retiro o intervención con obras civiles de estabilización con el fin de mitigar la inestabilidad.
- Los modelos del talud con mayor área de vulnerabilidad son los referentes Facultad de Forestal y Facultad de Medicina, ya que tienen alta densidad poblacional sumado a la mayor distancia de retiro.
- Los modelo del talud con mayor riesgo son los referentes Facultad de Forestal y Facultad de Medicina, ya que tienen la mayor área vulnerable, sumado a el alto grado de amenaza que existe en todo el borde de la terraza.
- La distancia de retiro por el método de equilibrio límite en estado seco, saturado y con carga sísmica a lo largo del borde de la terraza de Mérida varía desde 0 hasta 40 metros, desde 0 hasta 166 metros y desde 0 hasta 89 metros respectivamente.
- La distancia de retiro por teoría de colapso utilizada en rotura espiral logarítmica, rotura plana y rotura circular a lo largo del borde de la terraza de Mérida varía desde 0 hasta 15 metros, desde 5 hasta 68 metros y desde 0 a 80 metros respectivamente.
- La distancia de retiro por el método de cálculo variacional utilizada en rotura plana varía desde 0 hasta 14 metros.
- Existe alto grado de vulnerabilidad en el borde de la terraza de Mérida en las siguientes zonas de la ciudad: toda la longitud desde el

aeropuerto Alberto Carnevalli hasta el sector Vuelta de Lola, y desde la urbanización San Antonio hasta la Urbanización las Tapias.

- Existe baja y muy baja vulnerabilidad en el borde de la terraza de Mérida en las siguientes zonas: sector Campo de Oro, avenida Humberto Tejera, y sector Zumba.
- Existe alto grado de amenaza a lo largo de todo el borde de la terraza de Mérida, para dos eventos detonantes analizados por el método de equilibrio de límite, en estado saturado y con carga sísmica.
- Existe alto grado de riesgo en el borde de la terraza de Mérida en las siguientes zonas de la ciudad: toda la longitud desde el aeropuerto Alberto Carnevalli hasta el sector Vuelta de Lola, además desde la urbanización San Antonio hasta el comienzo de la Urbanización las Tapias. Asimismo, existe alto riesgo en la avenida Humberto Tejeras y Urbanización el Carrizal pero solo en el caso de alcanzar estado de saturación, ya que en el estado de carga sísmica estas dos últimas zonas están en bajo a moderado grado de riesgo.
- Existe bajo a moderado grado de riesgo en el borde de la terraza de Mérida en las siguientes zonas de la ciudad: sector Zumba, Urbanización La Mara, sector Campo de Oro y la parte baja de la Urbanización Las Tapias.
- Los mapas de vulnerabilidad con mayor utilidad para el uso en el ordenamiento territorial y diseño de obras civiles para la mitigación de inestabilidad del talud son, el realizado por el método de equilibrio límite con carga sísmica y el realizado por teoría del colapso utilizando rotura espiral logarítmica, ya que los dos toman en cuenta la ocurrencia del sismo, y se pueden comparar las distancias de retiro de estos dos mapas por este factor en común, y además tiene alta probabilidad de ocurrencia los dos tipos de roturas estudiados en estos dos métodos.

- El mapa de riesgo con mayor utilidad para el uso en el ordenamiento territorial y diseño de obras civiles para la mitigación de inestabilidad del talud es el realizado por el método de equilibrio límite con carga sísmica, ya que toma en cuenta un evento sísmico que es de alta probabilidad de ocurrencia, a diferencia del realizado en estado de saturación.

www.bdigital.ula.ve

Recomendaciones

Evaluar la evacuación de habitantes o la estabilización con obras de gran envergadura en los modelos del talud LR5A (Facultad de Forestal) y LR9A (Facultad de Medicina), correspondientes a la línea de referencia de la Facultad de Forestal y Facultad de Medicina de la Universidad de Los Andes, respectivamente, ya que en condiciones de estado seco y sin cargas externas el talud colapsa.

Evaluar la posibilidad de construcción de obras de estabilización de taludes, como, estructuras de contención, sistemas de drenaje y sub-drenaje, reconfiguración de la superficie del talud, en todos los modelos del talud estudiados para una altura o profundidad que aumente el factor de seguridad de la primera y segunda capa.

Cumplir con las distancias de retiro del borde del talud en la terraza de Mérida recomendadas en la presente investigación.

Estudiar la capacidad que tiene la terraza y específicamente su borde, de alcanzar el punto de saturación, que en la presente investigación evidencia el colapso de todos los modelos del talud en estudio si esta sucediese y además las magnitudes de las roturas (grandes distancias de retiro en la cresta) que produciría este estado, son muy significativas ya que abarcan zonas muy pobladas de la ciudad, como lo evidencia la Tabla 15.

Los taludes LR8A, y LR30A, no exigen una distancia de retiro significativa, sin embargo, se recomienda un estudio en dichos puntos más exhaustivo, ya que en ellos no se determinó la velocidad de onda V_p en la data inicial suministrada y se evaluaron según aproximaciones de los modelos más cercanos a estos.

A mayor profundidad de cimentación, la capacidad de soporte es mayor en los taludes. Por lo tanto, se recomienda, por ser zona sísmica, utilizar cimientos profundos para mitigar los efectos negativos de los sismos sobre la capacidad de soporte.

Se recomienda realizar más estudios de refracción sísmica, para obtener mayor cantidad de líneas ReMi distribuidas a lo largo de todo el borde de la terraza y así tener una data más representativa del área en estudio.

www.bdigital.ula.ve

Iniciar un proyecto de gestión de riesgo para los habitantes de la zona en estudio, manejando actividades de aviso, alarma y concientizar a la comunidad.

Suministrar esta investigación a Inpradem, Ministerio del Ambiente, y Consejo Municipal para ser utilizado como referencia en la planificación y otorgamiento de permisología.

Extender esta investigación al resto de los municipios en zonas de alto riesgo y someter los resultados a análisis estadísticos que fundamenten una normativa de aplicación con carácter legal.

Referencias Bibliográficas

- Arias, F. (2012). Antecedentes. El proyecto de investigación. Guía para su elaboración. Editorial Episteme. Caracas. Venezuela.
- Bañon Blazquez, L. (2015). *Estabilidad de taludes*. [Documento en línea]. Disponible: <https://docslide.net/download/link/estabilidad-de-taludes-luis-banon-blazquez>
- Bizquerra, R (1990). Métodos de Investigación Educativa. Guía Práctica. Barcelona, España: Ed. CEAC.
- Belandria, N. (2015). *Desarrollo de un método para el cálculo generalizado de estabilidad de taludes, basado en técnicas innovadoras del cálculo matemático y computacional*. Tesis doctoral, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida.
- Belandria, N., & Ucar, R. (2015). Comparación de la rotura parabólica en el estudio de la estabilidad de taludes por el método analítico y el cálculo variacional. *Ciencia e Ingeniería*, 36(3), 149-158.
- Belandria, N., Bongiorno, F., Rivas, D., & Moreno, S. (2015). Mapa de Riesgo Geotécnico con Fines de urbanismo en la vía de Mérida-Jají, Estado Mérida. *From Fundamentals to Applications in Geotechnics*, 2948-2956.
- Bongiorno, F., Belandria, N., Belandria, O., Castillo, F., & Molina, G. (Diciembre de 2015). Estudio geotécnico de los taludes ubicados entre el sector El Portachuelo y La Chorrera, vía Jají, municipio Campo Elías, estado Mérida. *Geominas*, 43(68), 147-157.
- Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN). (2001). *Edificaciones Sismoresistentes. Parte 1. Requisitos*. Caracas.

- Design Guidance. (1997). *Geotechnical Earthquake Engineering for Highways*. Publicación No FHWA-SA-97-076.
- Duncan, C., & Mah, C. (2004). *Rock Slope Engineering* (4th Edición ed.). (C. a. Mining, Ed.)
- Duncan, J., Buchignani, A., & Marius de Wet. (marzo de 1987). *An engineering manual for slope stability studies*. Obtenido de vulcanhammer.net: <http://www.vulcanhammer.org>
- Esri. (2015). *Arcgis*. Software.
- Fermín, O., & Ramírez, N. (2016). *Zonificación de susceptibilidad ante procesos Hidrogeomorfológicos en la zona comprendida desde Santa Juana hasta el sector la Punta, En el municipio libertador del estado Mérida*. Trabajo de grado, Universidad de los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica, Mérida.
- Finol, M. y Camacho, H. (2012). *El proceso de investigación científica*. (2ª.ed.). Ed. Ediluz.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer Gijón, M., Ortuño Abad, L., & Oteo Mazo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Hurtado, J (2016). *El proyecto de Investigación*. (reimpresión). Caracas, Venezuela: Ed. Sypal- Quirón.
- Imiriland. (2007). *Relevant criteria to assess vulnerability and Risk*. Torino, Italia.
- Jung Chang, C., Chen, W., & P. Yao, J. (1984). *Seismic Displacements in slopes by limit analysis*. Copyright ASCE.
- Lopez Avalos, J. M., Mejia Carrillos, J., & Vega, N. D. (2008). *Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P*. Trabajo de grado , Universidad del Salvador.

Maldonado, Yuleidy; Alvarado, Miguel; Ramírez, Nerio. (2016). *Zonificación de las Áreas Susceptibles por los movimientos de masa en el talud comprendido entre los Ríos Chama y Mucujún entre los Sectores de Vuelta de Lola –Santa Juana, del Municipio Libertador, Estado Mérida*. Trabajo de grado, Universidad de los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica, Mérida.

Maplesoft. (2016). *Maple*. Software.

Parella, S y Martins, F (2012). Metodología de la investigación cuantitativa. (3^o.ed.). Ed. Fedupel. Caracas. Venezuela.

Pelekais y Raspa, (2016). EL ABC de la Investigación. (3^a ed.). Ed. Astro Data. S.A. Maracaibo. Venezuela.

Peña, Greidy; Toro, Rosibeth; Ramírez, Nerio. (2016). *Zonificación de áreas susceptibles a ser afectadas por movimientos de masa en el talud de la terraza de Mérida, entre los sectores Bélen y Santa Elena, Municipio Libertador del estado Mérida*. Trabajo de grado, Universidad de los Andes, Ingeniería Geológica, Mérida.

Pérez, A(2007). Guía Metodológica. (3^o ed.). Caracas: Ed. FEDUPEL:

Pfister, P.; Evers, G.; Guillaud, M.; Davidson, R. (1982). *Permanent ground anchors: Soletanche design criteria* (Vols. Report#FHWA/RD-81/150). Department of Transportation, Washington DC, 195p.

República Bolivariana de Venezuela, Municipio Libertador, Estado Mérida. (26 de Febrero de 2008). Gaceta Municipal. *Gaceta Municipal Extraordinaria N°5 Año IV*, pág. 5.

Rivas, D., Meza, H., Belandria, N., & Bongiorno, F. (15 de Octubre de 2016). Análisis de estabilidad de taludes para la generación de un mapa de riesgo geotécnico empleando interpolaciones geoestadísticas. *Acta Científica*.

Rocscience. (2004). *Slide 5.0*. Software.

- Sánchez, N / (2007). *Técnicas y Metodología de la Investigación científica*. (3^o ed.), Venezuela: Ed. Livrosca. C.A.
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos: Analisis geotecnico*. Bucaramanga, Colombia.
- Tamayo y Tamayo, M (2007). *El proceso de la investigación científica*. (4^o ed.). México: Ed. Limusa.
- Tezcan, S. (2007). *A Rapid Technique to determine Allowable*. Kocaeli, Turkey: International Earthquake Symposium.
- Úcar Navarro, Roberto. (2010). *Analisis de estabilidad de taludes y diseño del soporte en la cuenca del chama*. Estudio para Tromerca, trolebús Mérida C.A., Mérida.
- Varnes, D. (1984). *Landslide hazard Zonation. A Review of Principles and practice*. Paris: unesco Press.

www.bdigital.ula.ve

ANEXOS

www.bdigital.ula.ve

ANEXOS 1:

DATOS PROPORCIONADOS POR FUNVISIS

www.bdigital.ula.ve

Líneas ReMi con sus respectivas coordenadas.

línea ReMi	ESTE	NORTE
LR1A	263425	954242
LR2A	263668	954081
LR3A	263995	953200
LR4A	263803	951932
LR5A	264709	952032
LR6A	264748	952385
LR7A	265526	953536
LR8A	262536	949205
LR9A	263157	950097
LR10A	263737	950593
LR11A	262962	951409
LR12A	263426	951175
LR13	261887	950111
LR14	252526	944222
LR15	253378	944523
LR16	254205	945404
LR17	254964	946247

Continuación de Líneas ReMi con sus respectivas coordenadas.

línea	ESTE	NORTE
LR18	262814	949703
LR19A	262513	950391
LR20A	269123	953931
LR21A	271496	954405
LR22A	266839	954634
LR23A	266851	955564
LR24A	263726	952033
LR25A	263400	951641
LR26	261556	950492
LR27	259093	948542
LR28	256694	946650
LR29	255893	947011
LR30	260195	948308
LR32	259898	948798
LR35B	262858	954245

Líneas ReMi con su respectiva referencia en la ciudad de Mérida y tipo de suelo

línea ReMi	Lugar de Referencia	Tipo de suelo
LR1A	Edif matemáticas (ciencias)	Suelo muy denso
LR2A	transversal núcleo pedro rincón	Suelo muy denso
LR3A	residencias domingo Salazar	Suelo muy denso
LR4A	núcleo liria	Suelo muy denso
LR5A	faculta de forestal	Suelo firmes
LR6A	avenida universidad	Suelo muy denso
LR7A	vuelta de lola	Suelo muy denso
LR8A	campo de oro	Suelo muy denso
LR9A	facultad de medicina	Suelo muy denso
LR10A	estadio Lourdes	Suelo muy denso
LR11A	cc el viaducto	Suelo muy denso
LR12A	cc plaza mayor	Suelo muy denso
LR13	transversal residencias el rodeo	Suelo muy denso
LR14	ejido diagonal aviso coca cola	Suelo muy denso
LR15	cementerio de Ejido	Suelo muy denso
LR16	ejido frente cc centenario	Suelo muy denso
LR17	enlace pan de azúcar	Suelo muy denso

Continuación de Líneas ReMi con su respectiva referencia en la ciudad de Mérida y tipo de suelo

línea ReMi	Lugar de Referencia	Tipo de suelo
LR18	aeropuerto Alberto Carnevalli	suelo tipo roca
LR19A	mercado principal	Suelo muy denso
LR20A	tabay	Suelo muy denso
LR21A	vía la mucuy	Suelo muy denso
LR22A	el vallecito alto	Suelo muy denso
LR23A	pista de aerodelismo	Suelo muy denso
LR24A	sector santa Anita	Suelo muy denso
LR25A	conjunto residencial rosa e	Suelo muy denso
LR26	av. los próceres sector pie del	Suelo muy denso
LR27	frente al cementerio la	Suelo muy denso
LR28	zumba	Suelo muy denso
LR29	campo claro	Suelo muy denso
LR30	avenida Andrés Bello	Suelo muy denso
LR32	Los bomberos	Suelo muy denso
LR35B	santa rosa	Suelo tipo roca

Líneas ReMi con su respectivo valor de densidad

línea ReMi	Densidad (gr/cc)					
	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6
LR1A	1,34	1,78	2,06	2,66		
LR2A	1,6	1,76	1,9	2,28	2,8	
LR3A	1,82	1,74	2,2	2,46		
LR4A	1,68	1,94	2,78			
LR5A	1,6	1,72	1,9	2,68		
LR6A	1,72	1,9	2,54			
LR7A	1,7	1,88	2,12	2,6		
LR8A	1,86	1,98	2,24	2,56		
LR9A	1,64	1,84	1,98	2,72		
LR10A	2,04	2,36	2,54			
LR11A	1,7	1,82	2,14	2,72		
LR12A	1,82	1,92	1,96	2,14	2,5	
LR13	1,76	1,84	1,92	1,84	2,4	
LR14	1,82	1,92	2,16	1,76	2,3	
LR15	1,96	2,22	2	2,32		
LR16	1,74	1,9	2,12	1,96	2,3	
LR17	1,96	2,14	2,4	2,62		

Continuación de Líneas ReMi con su respectivo valor de densidad

línea	Densidad (gr/cc)					
	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6
LR18	2,0	2,14	2,18	2,46		
LR19A	1,6	1,88	2,22	2,3		
LR20A	1,7	1,92	2,26	2,3		
LR21A	1,3	1,6	2,44	2,72		
LR22A	1,8	1,94	1,96	2,32	2,66	
LR23A	1,8	2,2	2,56	2,58	2,86	
LR24A	1,7	1,9	2,08	2,54		
LR25A	1,7	1,72	1,94	2,42		
LR26	1,6	2,26	2,46			
LR27	1,6	1,9	2,6			
LR28	1,7	1,98	2,04	2,38	2,52	
LR29	1,9	2,14	2,56			
LR30	1,6	1,76	1,84	1,96	2,2	2,4
LR32	1,3	1,54	1,66	1,78	1,88	
LR35B	1,8	1,92	1,96	2,1	2,72	

Líneas ReMi con su respectivo valor de velocidad de onda P

	Velocidad P (m/s)				
línea	capa1	capa2	capa3	capa4	capa 5
LR1A	913,09	930,68	1897,9	3463,	
LR2A	930,68	977,58	1188,6	1346,	2062
LR3A	1178,26	914,15	1806,2	2293,	
LR4A	749,83	1701,6	1953,0		
LR5A	438,74	673,51	1040,9	1759,	
LR6A	737,22	1909,7	2642,4		
LR7A	725,49	959,99	1411,	2249,	
LR8A	no se determinó				
LR9A	726,338	1037,4	1143,0	3050,	
LR10A	1008	2181,8	2410,7		
LR11A	509,17	796,76	1407,1	1735,	
LR12A	719,64	1018,6	1552,0	1188,	2067
LR13	no se				
LR14	996,32	920	2528,1	1236,	2005
LR15	no se determinó				
LR16	491,77	1396	1923,9	1847,	2035
LR17	no se				

Continuación de Líneas ReMi con su respectivo valor de velocidad de onda P

línea ReMi	Velocidad P (m/s)				
	capa1	capa2	capa3	capa4	capa 5
LR18	1194,4	1915,5	2067,9	3246,3	
LR19A	597,21	943,49	1307,3	1536,2	
LR20A	743,95	1072,6	1324,9	1430,6	
LR21A	479,83	931,75	1565,6	1759,3	
LR22A	497,44	687,21	743,95	1888,4	4153,
LR23A	966,97	1465,8	1512,8	1542,1	2545,
LR24A	571,63	669,78	1116,9	1862,1	
LR25A	726,34	702,86	1702,6	1976,4	
LR26	no se determinó				
LR27	no se determinó				
LR28	514,92	1501,0	1348,4	1548,0	1759,
LR29	no se determinó				
LR30	no se determinó				
LR32	684,45	883,73	1083,1	1200	1338
LR35B	1294,1	1411,3	1464,1	1253,1	2220,

Líneas ReMi con su respectivo valor de velocidad de onda S

línea ReMi	Velocidad S (m/s)				
	capa 1	capa 2	capa 3	capa4	capa5
LR1A	527,8	537,97	1097,09	2001,8	
LR2A	537,96	565,07	687,06	778,56	1191
LR3A	680,29	527,8	1042,87	1324,1	
LR4A	432,91	981,88	1127,59		
LR5A	253,32	388,86	600,98	1015,7	
LR6A	426,14	1103,87	1527,45		
LR7A	419,36	554,91	815,83	1300,4	
LR8A	707,4	731,12	995,43	1100,4	
LR9A	419,36	598,96	659,96	1761,2	
LR10A	582,02	1259,75	1391,91		
LR11A	293,98	460,03	812,44	1002,2	
LR12A	415,97	588,79	897,16	687,07	1195
LR13	402,42	578,63	710,78	656,57	1076
LR14	575,24	531,19	1459,68	714,17	1158
LR15	524,41	1161,48	819,22	903,94	
LR16	283,81	632,84	1053,04	951,38	1175
LR17	758,23	1059,82	1188,59	1388,5	

Continuación de Líneas ReMi con su respectivo valor de velocidad de onda P

línea ReMi	Velocidad S (m/s)				
	capa 1	capa 2	capa 3	capa4	capa5
LR18	1194,49	1915,5	2067,9	3246,3	
LR19A	597,21	943,49	1307,3	1536,2	
LR20A	743,95	1072,6	1324,9	1430,6	
LR21A	479,83	931,75	1565,6	1759,3	
LR22A	497,44	687,21	743,95	1888,4	4153,9
LR23A	966,97	1465,8	1512,8	1542,1	2545,7
LR24A	571,63	669,78	1116,9	1862,1	
LR25A	726,34	702,86	1702,6	1976,4	
LR26	no se determinó				
LR27	no se determinó				
LR28	514,92	1501,0	1348,4	1548,0	1759,3
LR29	no se determinó				
LR30	no se determinó				
LR32	684,45	883,73	1083,1	1200	1338
LR35B	1294,15	1411,3	1464,1	1253,1	2220,4

Líneas ReMi con su respectivo valor de espesor

línea ReMi	Espesores				
	capa 1	capa 2	capa3	capa 4	capa 5
LR1A	31	26	32	-	-
LR2A	27	21	14	19	-
LR3A	8,6	27,2	16,8	-	-
LR4A	20,2	46,6	-	-	-
LR5A	25,9	35,5	5,6	-	-
LR6A	21	54,8	-	-	-
LR7A	15	16,4	18,31	-	-
LR8A	5,44	35,1	33,19	-	-
LR9A	13,9	58,5	68,4	-	-
LR10A	18	35	-	-	-
LR11A	8,73	10,2	48,6	-	-
LR12A	16	25	25	44	-
LR13	17,2	15,75	19,5	27	-
LR14	11	19,31	16,43	49,28	-
LR15	19	12,4	33,29	-	-
LR16	4,39	28,02	26,74	52,77	-
LR17	30,4	20,33	64,14	-	-

Continuación de Líneas ReMi con su respectivo valor de espesor

línea ReMi	Espesores				
	capa 1	capa 2	capa3	capa 4	capa 5
LR18	26,4	36,6	29,4	-	-
LR19A	8,7	5,6	46,8	-	-
LR20A	10	5,7	49,5	-	-
LR21A	5,18	10,1	45,383	-	-
LR22A	8,2	13,4	10,1	67,12	-
LR23A	9,48	15,4	34,98	23,716	-
LR24A	8,13	9,9	31	-	-
LR25A	8,29	2,87	20,8	-	-
LR26	11,3	29,3	-	-	-
LR27	10	18,5	-	-	-
LR28	6,78	4,47	4,5	31,72	-
LR29	51,7	78	-	-	-
LR30	10,9	13,1	21,42	26,92	33,52
LR32	12	18	18,8	22,61	-
LR35B	22	35	37,5	42	-

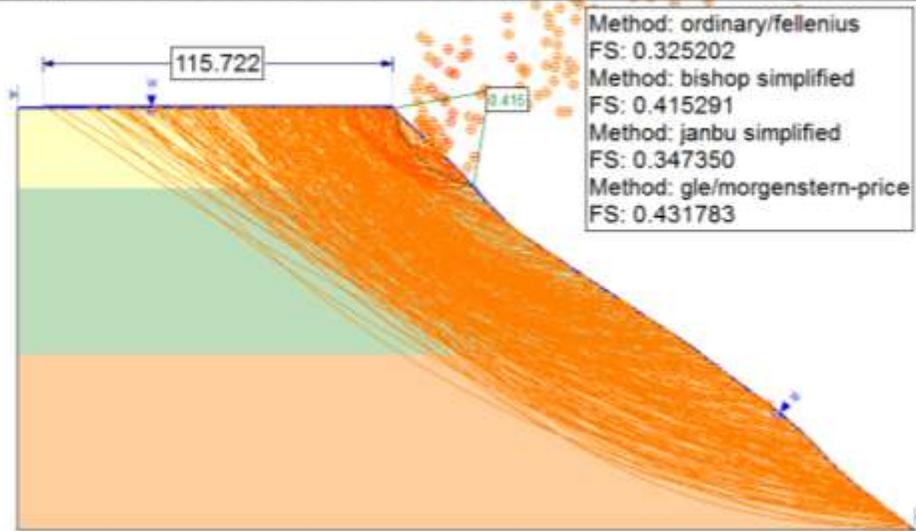
ANEXOS 2:

MODELOS DEL TALUD EN SOFTWARE SLIDE

- Estado saturado
- Con carga sísmica

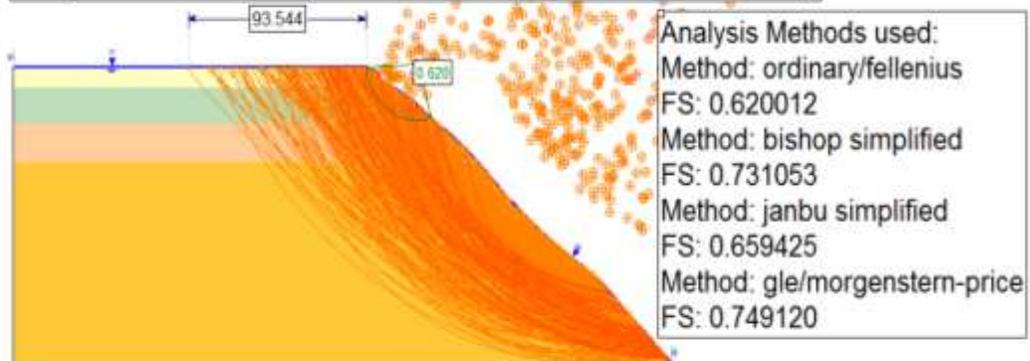
www.bdigital.ula.ve

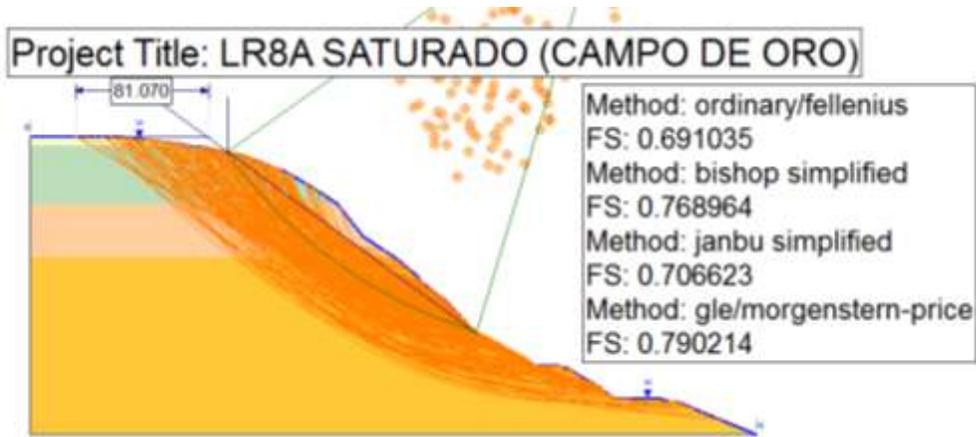
Project Title: LR6A SATURADO (AVENIDA UNIVERSIDAD)



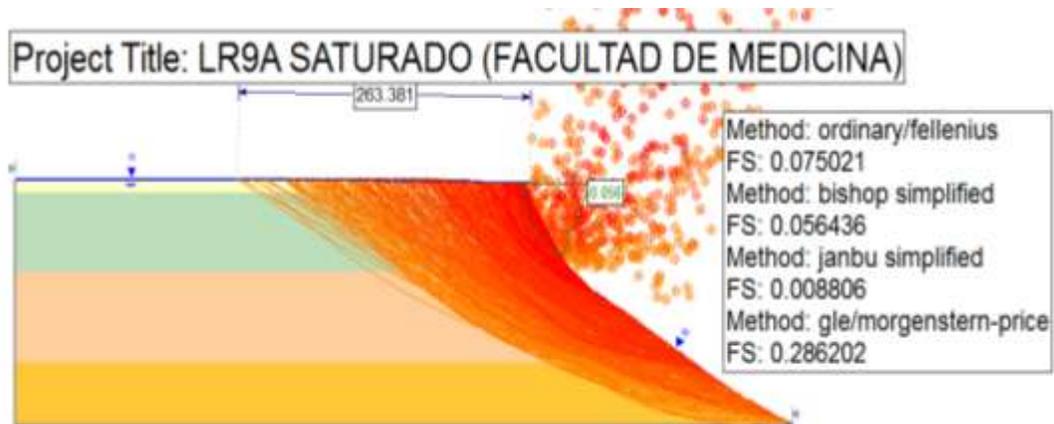
www.bdigital.ula.ve

Project Title: LR7A SATURADO (VUELTA DE LOLA)

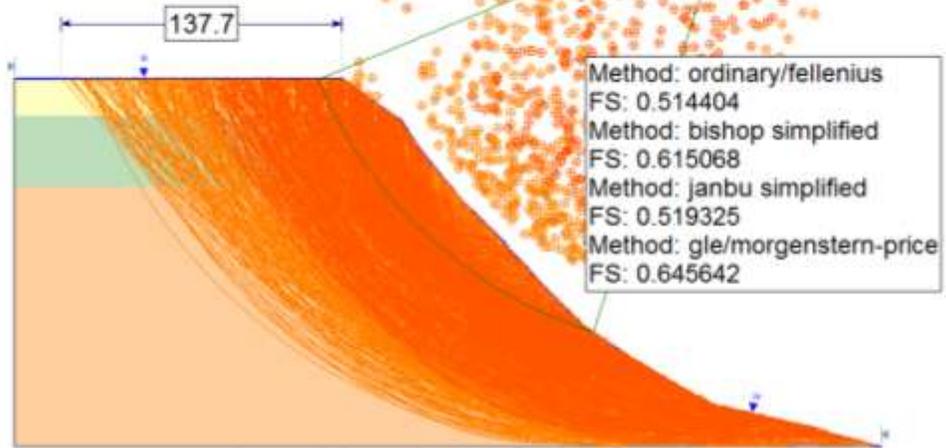




www.bdigital.ula.ve

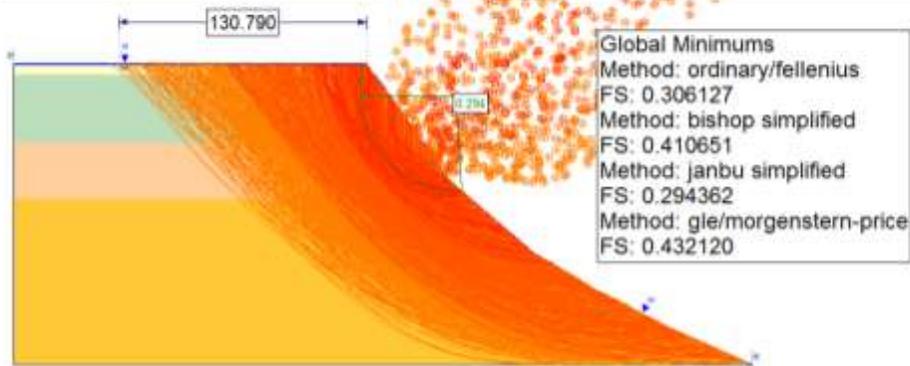


Project Title: LR10A ESTADO SATURADO (ESTADIO LOURDES)

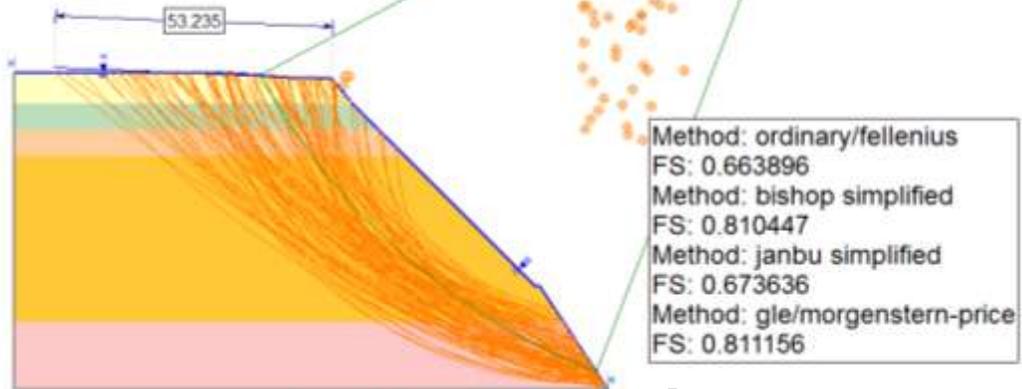


www.bdigital.ula.ve

Project Title: LR18 SATURADO (AEROPUERTO ALBERTO CARNEVALLI)

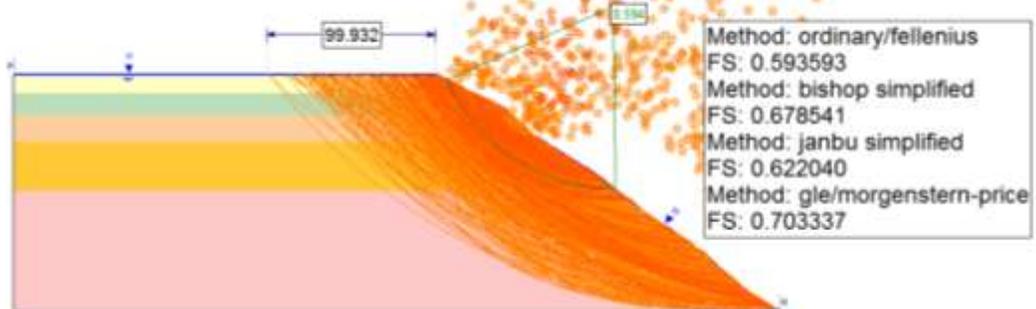


Project Title: LR28 SATURADO (SECTOR ZUMBA)

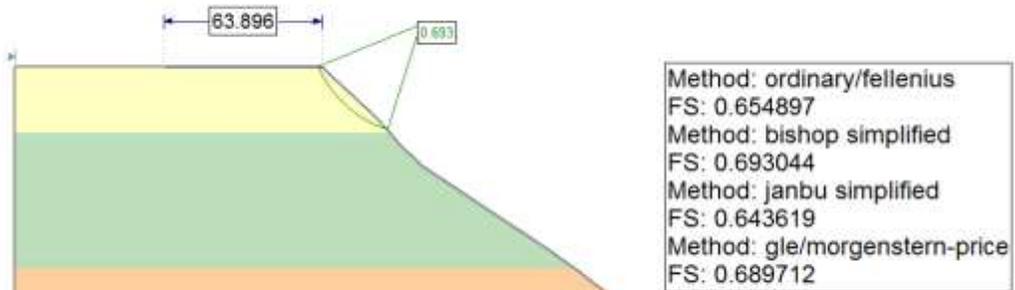


www.bdigital.ula.ve

Project Title: LR30 SATURADO (AVENIDA ANDRES BELLO)

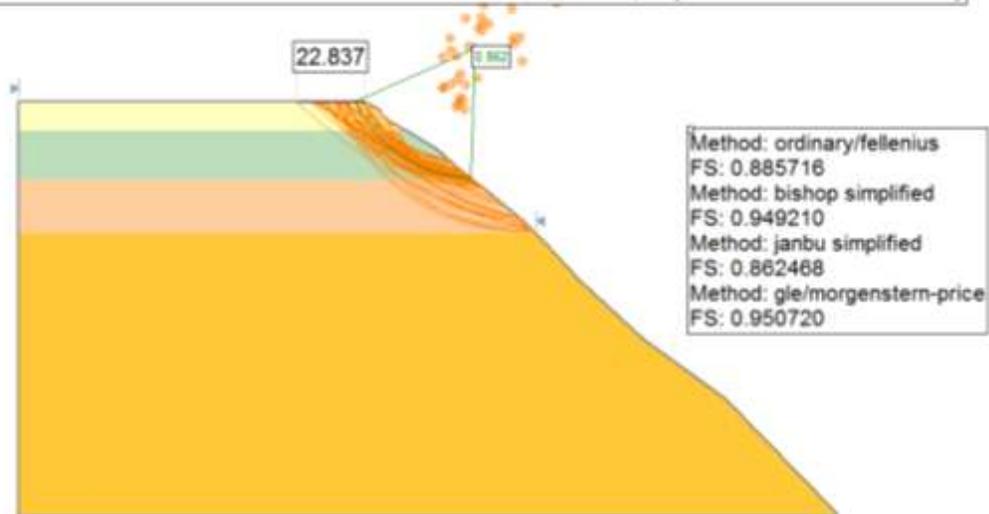


Project Title: LR6A CON CARGA SÍSMICA $K_h=0,3$ (AVENIDA UNIVERSIDAD)

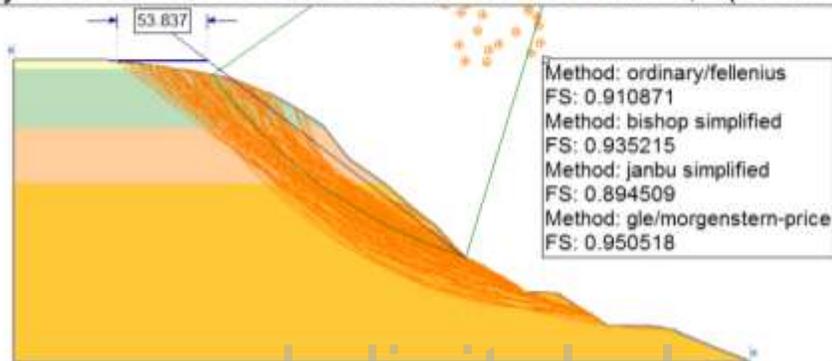


www.bdigital.ula.ve

Project Title: LR7A CON CARGA SÍSMICA $K_h=0,3$ (VUELTA DE LOLA)

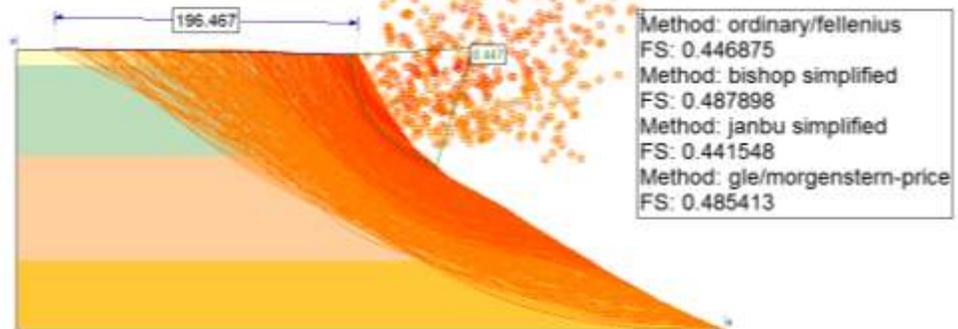


Project Title: LR8A CON CARGA SÍSMICA $K_h=0,3$ (CAMPO DE ORO)

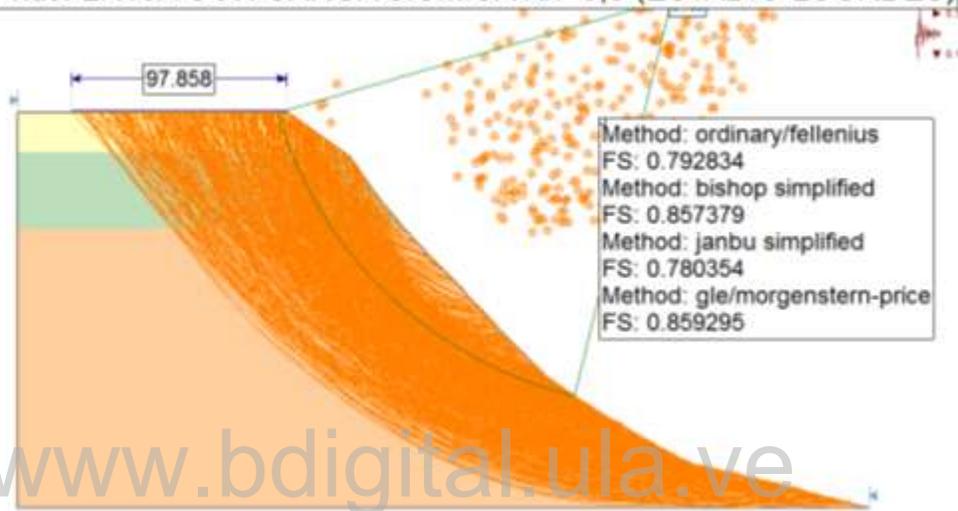


www.bdigital.ula.ve

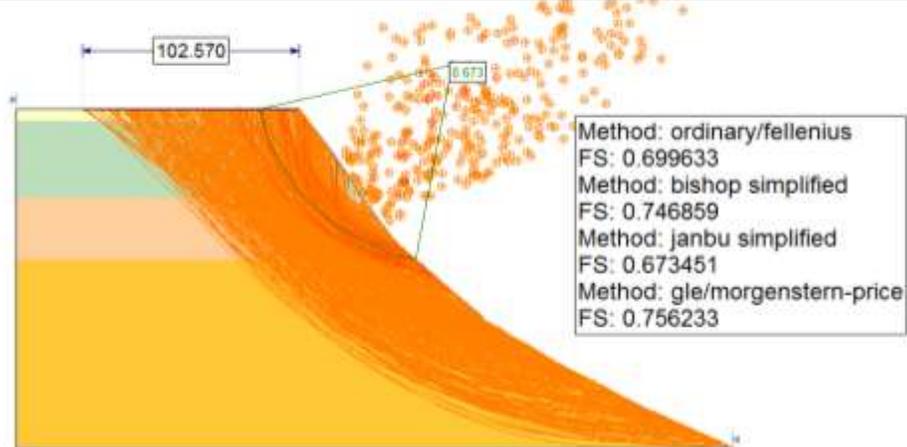
Project Title: LR9A CON CARGA SÍSMICA $K_h=0,3$ (FACULTAD DE MEDICINA)



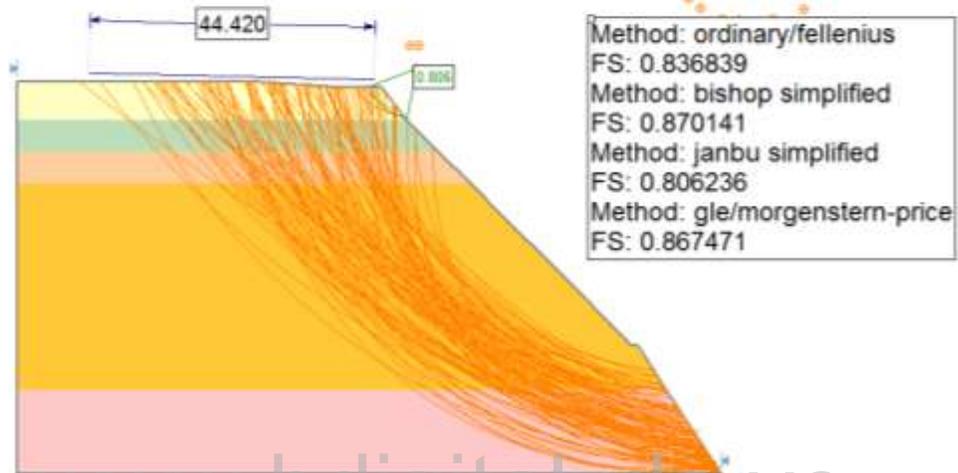
Project Title: LR10A CON CARGA SÍSMICA $K_h=0,3$ (ESTADIO LOURDES)



Project Title: LR18 CON CARGA SÍSMICA $K_h=0,3$ (AEROPUERTO ALBERTO CARNEVALLI)

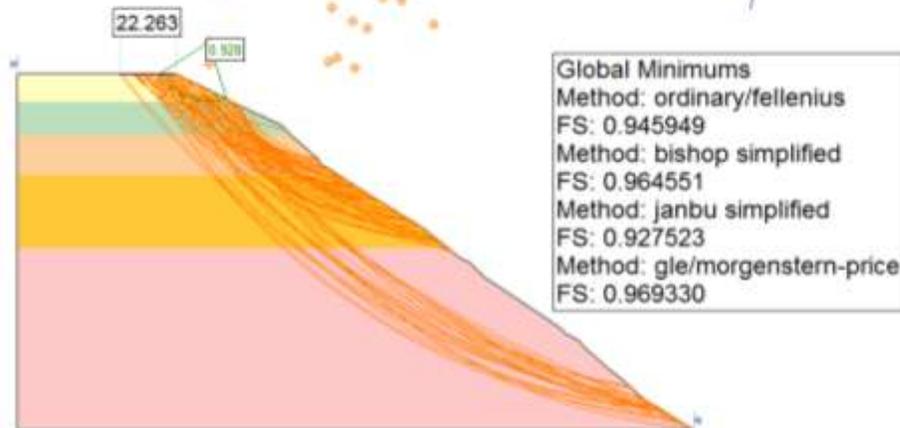


Project Title: LR28 CON CARGA SÍSMICA (ZUMBA)



www.bdigital.ula.ve

Project Title: LR30 CON CARGA SÍSMICA $K_h=0,3$ (AVENIDA ANDRES BELLO)



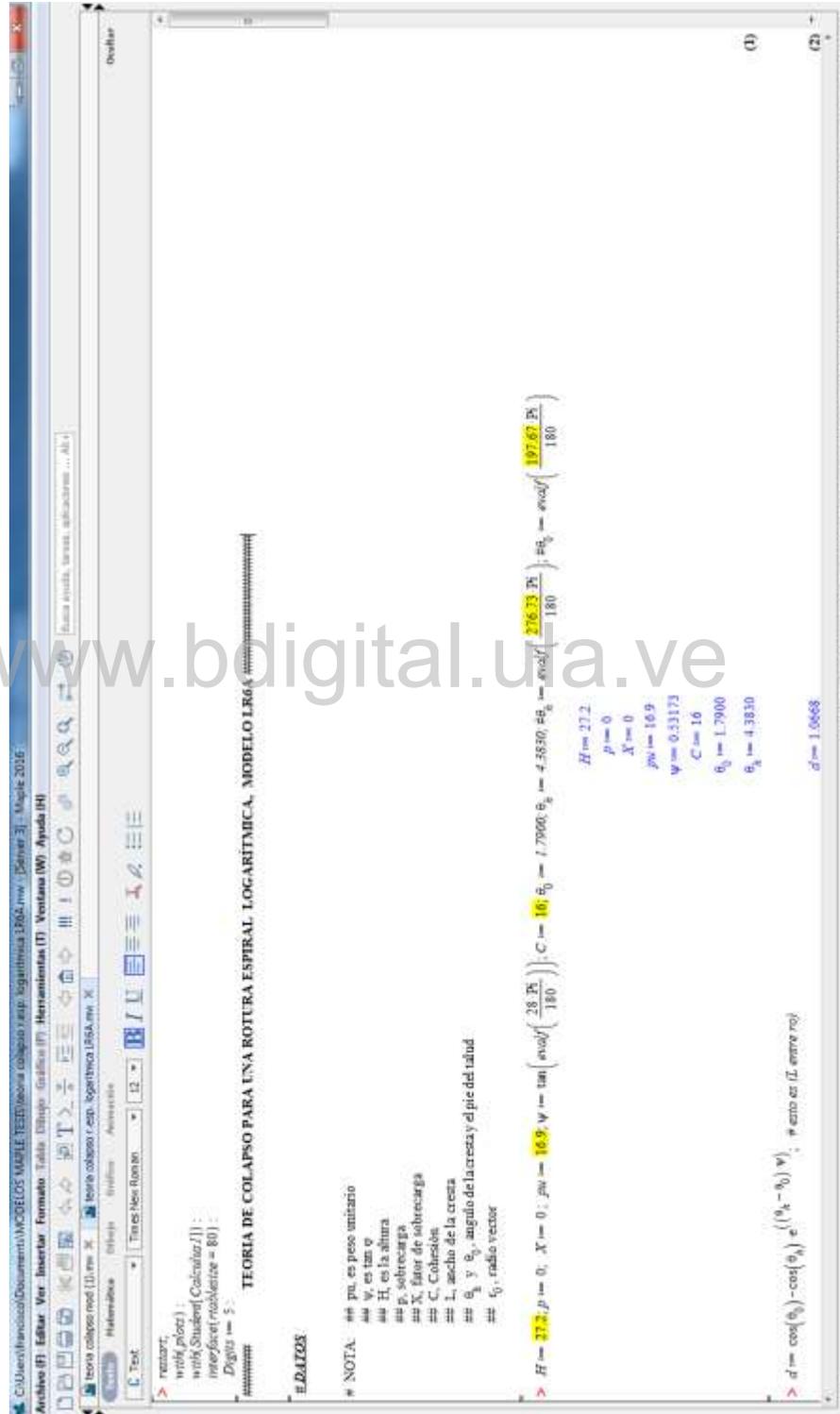
ANEXOS 3:

ANÁLISIS DEL TALUD EN PROGRAMA MAPLE

- Teoría del Colapso
- Cálculo Variacional

www.bdigital.ula.ve

Datos en teoría de colapso por rotura espiral logarítmica, modelo LR6A (avenida Universidad)



Resultados en teoría de colapso por rotura espiral logarítmica, modelo LR6A (avenida Universidad)

The screenshot shows a mathematical software interface with the following content:

Equations (7) through (14) are displayed on the left side of the window:

- (7) $f_4 := \frac{(3 \cdot \psi \sin(\theta_0) - \cos(\theta_0)) e^{(\theta_0 - \theta_0) \psi} - 3 \cdot \psi \sin(\theta_0) + \cos(\theta_0)}{3(1 + 9 \cdot \psi^2)}$
- (8) $f_5 := \frac{1}{\theta} (2 \sin(\theta_0)) \sin(\theta_0)$
- (9) $f_6 := \frac{1}{\theta} e^{(\theta_0 - \theta_0) \psi} (\sin(\theta_0 - \theta_0) - \theta \sin(\theta_0) \sin(\theta_0) + \sin(\theta_0) e^{(\theta_0 - \theta_0) \psi})$
- (10) $f_7 := \theta \left(\cos(\theta_0) - \frac{1}{2} (\theta) \right)$
- (11) $f_8 := \theta \sin(\theta_0)$
- (12) $K_c := \frac{C \cdot f_6 - \left(\frac{\rho \psi (f_5 - f_7 - f_8) H}{\sin(\theta_0) e^{(\theta_0 - \theta_0) \psi} - \sin(\theta_0)} \right) - P f_8}{\left(\frac{\rho \psi (f_4 - f_5 - f_6) H}{\sin(\theta_0) e^{(\theta_0 - \theta_0) \psi} - \sin(\theta_0)} \right) + X P f_5}$
- (13) $\theta_0 := \frac{H}{\sin(\theta_0) e^{(\theta_0 - \theta_0) \psi} - \sin(\theta_0)}$
- (14) $L := \theta_0 \left(\cos(\theta_0) - \cos(\theta_0) e^{(\theta_0 - \theta_0) \psi} \right)$
- (14) $d := \frac{d}{f_4} K_c$

On the right side, the numerical solutions for these equations are listed:

- $f_4 := -7.1454$
- $f_5 := 0.33373$
- $f_6 := -2.7680$
- $f_7 := -0.80101$
- $f_8 := 1.0413$
- $K_c := -0.75167$
- $\theta_0 := 5.7471$
- $L := 6.1310$

A watermark "www.bdigital.ula.ve" is visible across the center of the image.

Datos y resultados de teoría de colapso por rotura plana, modelo LR30
(avenida Andrés Bello)

TEORIA DE COLAPSO PARA UNA ROTURA PLANA, MODELO LR30

DATOS

> H := 192.5; p := 0; X := 0; pu := 17.4; $\phi := \arcsin\left(\frac{33.39 \text{ PK}}{180}\right)$; C := 19.93; $\beta := \arcsin\left(\frac{33 \text{ PK}}{180}\right)$; $\theta := 0.54156 \cdot \phi := \arcsin\left(\frac{25.64 \text{ PK}}{180}\right)$; H := 39.5

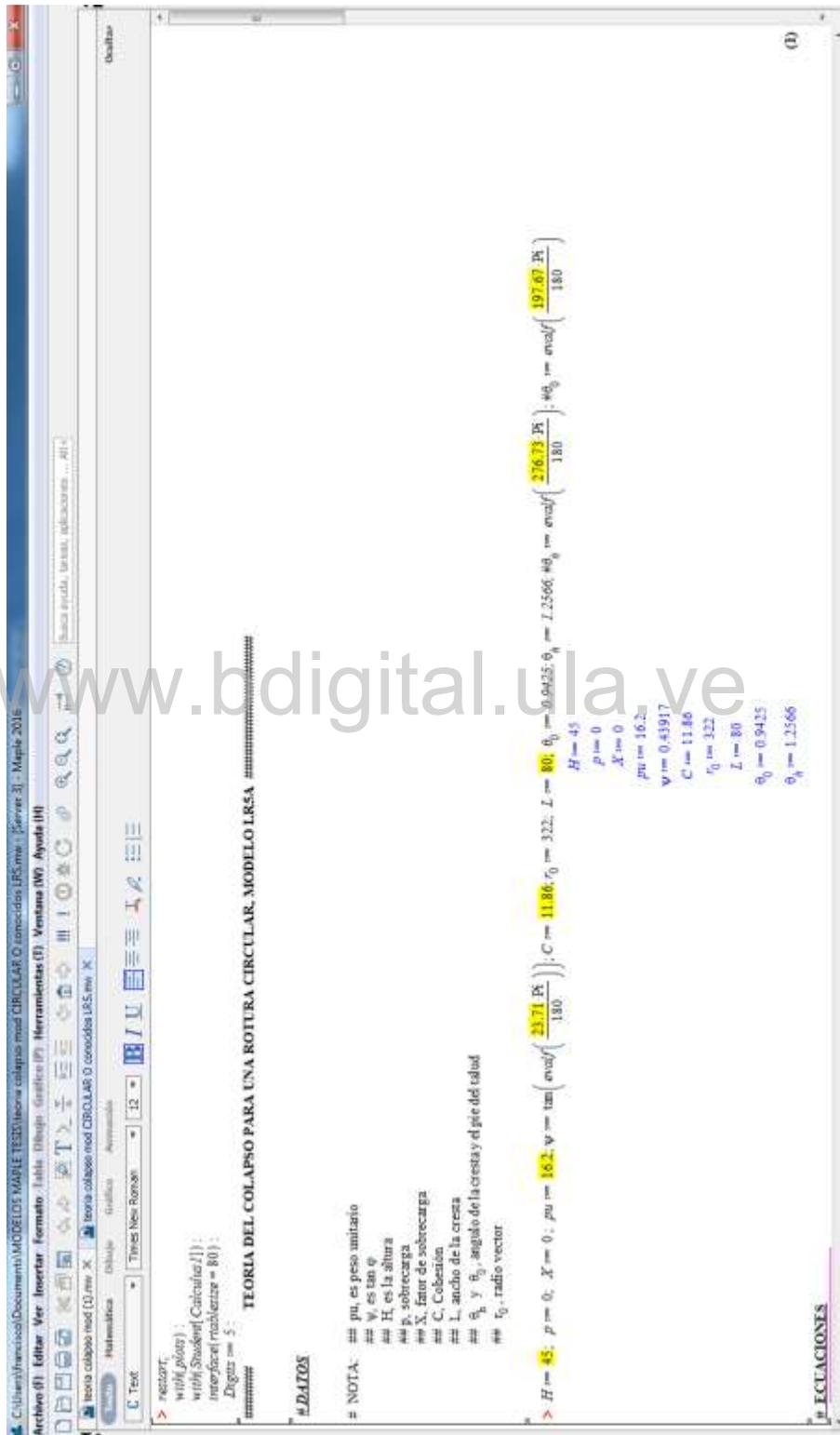
pu := 0
X := 0
pu := 17.4
 $\phi := 0.586073$
C := 19.93
 $\beta := 0.619853$
 $\theta := 0.54156$
 $\theta := 0.44749$
H := 21
p := 0
X := 0
pu := 16.65
 $\phi := 0.488711$
C := 20
 $\beta := 0.75050$

$$K_c := \frac{C \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\beta)}{\sin(\beta - \theta) \cdot \cos(\theta - \phi)} - p \cdot \tan(\theta - \phi) - H \cdot \frac{pu}{2} \cdot \tan(\theta - \phi)$$

$$S := \frac{d}{d\theta} K_c$$

$K_c := 0.31168$

Datos en teoría de colapso por rotura circular, modelo LR5A (Facultad de Forestal)



Resultados en teoría de colapso por rotura circular, modelo LR5A
(Facultad de Forestal)

$$f_2 = \frac{1}{3} e^{((\theta_3 - \theta_0) \Psi)} \left(\sin(\theta_3 - \theta_0) - \left(\frac{H}{r_0} \right) \sin(\theta_3) \cos(\theta_0) - \left(\frac{L}{r_0} \right) + \cos(\theta_3) e^{((\theta_3 - \theta_0) \Psi)} \right)$$

$$f_3 = \frac{(1 + \sin(\theta_3) - \cos(\theta_3)) e^{((\theta_3 - \theta_0) \Psi)} - 1 + \sin(\theta_3)}{2(1 + \sin(\theta_3))}$$

$$K = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{3} \right) \sin(\theta_3)$$

$$\theta_0 = \frac{1}{3} \cos(\theta_3) \sin(\theta_0) \left(\frac{H}{r_0} \right) e^{((\theta_3 - \theta_0) \Psi)}$$

$$f_4 = \frac{1}{3} e^{((\theta_3 - \theta_0) \Psi)} \left(\sin(\theta_3 - \theta_0) - \left(\frac{H}{r_0} \right) \sin(\theta_3) \cos(\theta_0) + \sin(\theta_3) \right)$$

$$f_5 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{3} \right) \cos(\theta_3) \sin(\theta_0)$$

$$f_6 = \frac{1}{3} \sin(\theta_3)$$

$$C_f = \left(\frac{pw (f_1 - f_2 - f_3) H}{\sin(\theta_3) e^{((\theta_3 - \theta_0) \Psi)} - \sin(\theta_0)} - P f_f \right)$$

$$K_c = \left(\frac{pw (f_4 - f_5 - f_6) H}{\sin(\theta_3) e^{((\theta_3 - \theta_0) \Psi)} - \sin(\theta_0)} + X P f_g \right)$$

$$A = \frac{d}{K_c}$$

(5) $f_2 = 0.11448$
 (6) $f_3 = 0.11571$
 (7) $f_4 = 0.654205$
 (8) $f_5 = 1.1029$
 (9) $f_6 = 0.11517$
 (10) $f_7 = 0.20100$
 (11) $K_c = -0.086246$

www.bdigital.ula.ve

Resultados en Cálculo Variacional por rotura circular, modelo LR8A
(Campo de Oro)

The screenshot shows a mathematical software interface with the following content:

- Menu Bar:** Archivo (F), Editar, Ver, Insertar, Formato, Tabla, Dibujo, Gráficos (F7), Herramientas (D), Ventanas (W), Ayuda (H)
- Toolbar:** Includes icons for undo, redo, copy, paste, and other standard editing functions.
- Main Workspace:**
 - Equation (7):
$$f_4 := \left(0.0355557053 \left(\sqrt{R^2 + y_2} - 60.1 + x_2 - 25.54250000 \right) \left(3 \sigma_2 - 4 \sigma_3 + \sigma_2 \right) + 0.7265425281 \sigma_3 + 70.24 \left(0.04893804444 \left(\sqrt{R^2 + y_2} - 60.1 + x_2 - 25.54250000 \right) \left(-3 \sqrt{R^2 - (35.75950000 - x_2)} \right)^2 + 4 \sqrt{R^2 - (25.54250000 - x_2)}^2 - \sqrt{R^2 - (15.32550000 - x_2)}^2 \right) - \sqrt{R^2 - (25.54250000 - x_2)}^2 \right) - \sqrt{R^2 - (25.54250000 - x_2)}^2 \left(3 \sigma_2 - 4 \sigma_3 + \sigma_2 \right) + \sigma_3 \sqrt{R^2 + y_2} - 60.1$$
 - Equation (8):
$$f_5 := \text{root}\left(\begin{cases} \text{ecuciones} := \text{seq}(f_i, i = 1..j+4) \\ \text{incognitas} := \text{seq}(\sigma_i, i = 1..j) \end{cases} \right)$$
 - Final results:
$$\text{float}(\text{eval}(\text{ecuciones}), \{x_2, y_2, \sigma_2, \sigma_3, R, \text{incognitas}\}, \{\text{FS} = 0, \text{JO} = 0, R = 0, \text{SO} = 1\})$$

$$\left\{ \text{FS} = 0.026741167, R = 24.76650488, \sigma_1 = -568.2426974, \sigma_2 = -541.2775964, \sigma_3 = -411.7958032, \sigma_4 = -155.8409441, x_2 = 14.00455745, y_2 = 54.60588704 \right\}$$

Datos en Cálculo Variacional por rotura plana, modelo LR9A (Facultad de Medicina)

```

C:\Users\francisco\Documents\MODELOS MAPLE TEST\programacion\ROTURA PLANA.exe 1 en 2 Critica, tamaño: 109.000 KB, Server 3, Maple 2016
Archivo (F) Editar Ver Insertar Formato Lado Diseño Gráfico (P) Herramientas (O) Ventana (W) Ayuda (H)
teoria calculo rod (1).m X Programacion ROTURA PLANA.exe 1 en 2 Critica, código 193.m X
Teoría Calculo Variacional
Tercer Nivel Español 32
B O U
resalt;
width(plot);
width(Stokes[Calculos]);
intefocal(maMatrix = 80);
RDigit:=10;

H := 63; # altura del riñón en (m)
CR := 0.75; # radio de la cresta (m)
r := 4; # rebanadas
d := r - 2; # llega hasta la rebanada seleccionada -2
dx := CR - AB := CR; # valores del ancho de la rebanada. # valor de la integración

C := 18.55; v := tan( arctan( 33.36 / 180 ) );
K2 := 0; K3 := 0; pu := 17.8;

===== CÁLCULO VARIACIONAL PARA ROTURA PLANA =====

for m from 1 by 1 to d do # valores de precision de poros
  xm := 0;
end do;

x0 := 0 - x1 := dx;

for w from 2 by 1 to r do # valores de e en la superficie de rotura del riñón
  xm := xm - 1 + dx;
end do;

x2+1 := x2 + dx;

for w from 1 by 1 to r + 2 do # valores de y en la superficie de rotura del riñón
  ym-1 := ym-1 - 0;
end do;

```

www.bdigital.ula.ve

Resultados en Cálculo Variacional por rotura plana, modelo LR9A
(Facultad de Medicina)

The screenshot shows a software window titled "Programación ROTURA PLANA eoder 1 en 2 Orliza, castillo LR9A.mw". The workspace contains the following mathematical expressions and code:

$$x_{r+1} := \frac{H}{\omega}$$

$$y_{r+1} := H \cdot \left(\frac{\frac{H}{\omega} - \frac{5}{2} \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta k}}{\frac{H}{\omega} - \frac{5}{2} \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta k}} (3y_r - 4y_{r-1} + y_{r-2}) + y_{r-1} \right)$$

$$G_{r+1} := \left(\frac{\frac{H}{\omega} - \frac{5}{2} \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta k}}{\frac{H}{\omega} - \frac{5}{2} \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta k}} (3\sigma_r - 4\sigma_{r-1} + \sigma_{r-2}) + \sigma_{r-1} \right)$$

$$u_{r+1} := \left(\frac{\frac{H}{\omega} - \frac{5}{2} \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta k}}{\frac{H}{\omega} - \frac{5}{2} \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta k}} (3u_r - 4u_{r-1} + u_{r-2}) + u_{r-1} \right)$$

ECUACIÓN DE TRANSVERSALIDAD EN LA CRESTA DEL TALUD

$$\Psi_{r+1} := \Psi \left(-(C + (\sigma_{r+1} - u_{r+1}) \Psi) (x_{r+1} - x_r) - FS \sigma_{r+1} (y_{r+1} - y_r) + (C + (\sigma_{r+1} - u_{r+1}) \Psi) (y_{r+1} - y_r) - FS \sigma_{r+1} (x_{r+1} - x_r) + FS g_r (\sigma_{r+1} - x_r) - FS g_r (x_{r+1} - x_r) \right)$$

$$f_0 := \left(0.01013996798 \left(\frac{\Delta z}{\omega} - 27.12500000 \right) (3\sigma_1 - 4\sigma_2 + \sigma_3) + 0.6583773051 \sigma_2 + 18.55 \left(1.000000000 \left(\frac{\Delta z}{\omega} + 27.12500000 \right) \omega + 27.12500000 \omega - y_1 \right) - FS \left(0.04608294931 \left(\frac{\Delta z}{\omega} - 27.12500000 \right) (3\sigma_1 - 4\sigma_2 + \sigma_3) + \sigma_2 \right) \left(\frac{\Delta z}{\omega} - x_1 \right) \right)$$

ecuaciones := seq(f_i | i = 1..r+4)
incógnitas := seq(G_i | i = 1..r)

Solve({ ecuaciones }, { x_r, y_r, FS, \omega, incógnitas }, { FS = 0..10, \omega = 0..2.1 })

{ FS = 0.8150404849, \omega = 1.008975033, \sigma_1 = 28.28115925, \sigma_2 = 84.84359776, \sigma_3 = 141.4055963, G_1 = 197.9683948, x_1 = -9.966314095, y_1 = -19.26094740 }